



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

DIEGO BANDEIRA DE OLIVEIRA

**O USO DO RESÍDUO PEDRA CARIRI COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA
APLICAÇÃO EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS**

FORTALEZA

2016

DIEGO BANDEIRA DE OLIVEIRA

O USO DO RESÍDUO PEDRA CARIRI COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA
APLICAÇÃO EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS

Dissertação submetida à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transporte

Orientadora: Prof^ª. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O46u Oliveira, Diego Bandeira de.
O uso do resíduo pedra Cariri como material alternativo para aplicação em camadas granulares de pavimentos / Diego Bandeira de Oliveira. – 2016.
112 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.
Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.
1. Pedra Cariri. I. Título.

CDD 388

DIEGO BANDEIRA DE OLIVEIRA

O USO DO RESÍDUO PEDRA CARIRI COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA
APLICAÇÃO EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS

Dissertação submetida à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transporte

Aprovada em 31 / 10 / 2016.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Augusto Uchôa da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

À minha mãe Lucia.

AGRADECIMENTOS

À pessoa que mais me incentivou a continuar mesmo em meio a tantas dificuldades: minha mãe Lucia, forte colaboradora deste trabalho, muito obrigado.

À família de forma geral pelo apoio, eles estão sempre torcendo por mim.

À minha noiva, pela paciência, apoio e dedicação, por ter suportado a distância e ajudado nas intempéries da vida.

À uma família que considero minha também, minha segunda mãe e meu irmão: Dona Rosa e Anderson Jhonny. Vocês me trataram muito bem no tempo que estive na casa de vocês. Uma dívida impagável. Levarei essa amizade para sempre.

Aos amigos que colaboraram direta e indiretamente nesse trabalho: Ilânia Mascarenhas, companheira e confidente desde a graduação, certeza que posso contar sempre. À Camila pela ajuda e pelos pequenos debates acadêmicos que ajudaram nas soluções de vários impasses. Ao Júnior, pelas dicas e sacadas totalmente convenientes e oportunas.

Ao casal mais bonito que conheço: Lilian e Boris. Vou carregar vocês para o resto da vida. Lilian você me orienta desde sempre, muito obrigado. Boris, sem você, não teria conseguido, acho que você sabe disso.

À minha orientadora, Suelly Helena, pelas lições e direções que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Aos examinadores, Uchôa e Lêda, que se prontificaram com seu precioso tempo a participar da banca examinadora para contribuir e sugerir nesta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao rei eterno, o único imortal e invisível.

RESUMO

A crescente preocupação com o meio ambiente e a autossustentabilidade tem incentivado várias pesquisas na área da pavimentação para incorporação de resíduos em suas diversas camadas. A disposição final dos resíduos sólidos, sem um gerenciamento apropriado, acarreta a poluição do solo, do ar e de recursos hídricos, podendo resultar em danos aos seres humanos e ao meio ambiente. A lei 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil e demonstra a preocupação com esse problema. Na Região Metropolitana do Cariri (RMC) há um polo mineral nas cidades de Nova Olinda e Santana do Cariri que comercializa uma rocha ornamental chamada Pedra Cariri. A Pedra Cariri é um calcário laminado, de cor amarelada ou azulada, utilizado na construção civil como piso e revestimento. O Resíduo Pedra Cariri (RPC) foi estudado no presente trabalho em função da potencialidade do seu uso na pavimentação e da sua considerável quantidade acumulada que é de cerca de 1 milhão de m³. O objetivo deste trabalho foi investigar a viabilidade técnica e de custos do emprego do RPC como material alternativo em camadas granulares de pavimentos. Para tanto, dividiu-se a pesquisa em quatro etapas. Na primeira etapa foi investigada a estabilização granulométrica de dois solos da RMC com o RPC, sendo verificado que as misturas podem ser usadas para sub-base de pavimentos e que o RPC puro possui elevada resistência natural. Na segunda etapa, foi realizada a avaliação do RPC puro e encaixados nas faixas granulométricas A, B, C e D do DNIT de modo que foram selecionadas as duas melhores curvas do RPC para estabilização com cimento. A terceira etapa constou da estabilização química com cimento das duas melhores misturas, definidas na segunda etapa, para se investigar a melhoria do comportamento mecânico do RPC puro. Na quarta etapa, realizou-se o dimensionamento empírico e mecanístico-empírico de pavimentos com RPC, bem como foi realizada a análise técnica e de custos. Os resultados experimentais apresentados mostraram que o Resíduo Pedra Cariri se mostrou viável tecnicamente e economicamente para construção de camadas granulares dos pavimentos.

Palavras-chave: Pedra Cariri. Resíduo. Pavimentação.

ABSTRACT

The growing preoccupation with the environment and the self-sustainability have encouraged many researches in the paving area for adding residues in its different layers. The final disposition of the residues, with no proper management, causes the pollution of air, soil and hydro resources, which may result in damage to human beings and environment. The law 12.305/2010 instituted the National Policy of Solid Waste in Brazil and it shows the concern with the issue. In Metropolitan Region of Cariri (MRC), located to the south of Ceará, Brazil, there is a mineral pole in the cities of Nova Olinda and Santana do Cariri that commercializes an ornamental rock whose name is Cariri Stone. The Cariri Stone Residue (CSR) was studied at the present research due to the potentiality of its use in paving and to its considerable accumulated quantity, over 1 million m³. Cariri Stone is a laminated calcareous in yellowish or bluish color. It is used for civil construction as floor and coating for walls. The objective of this research was to investigate the technical and costing viability of applying the CSR as alternative material in granular layers of pavements. So, the research was divided in four stages. On the first stage, it was investigated the granulometric stabilization of two soils from MRC with the CSR, it was verified that these mixtures can be used for pavement sub-base layers and that the pure CSR has high natural resistance. On the second stage, it was performed an evaluation of pure CSR and the CSR fitted in the A, B, C and D granulometric zones of DNIT, selecting the two best curves of CSR. The third stage was to make a chemical stabilization with cement of the two best mixtures, defined on the second stage, to verify the improvement in mechanical behavior of pure CSR. On the fourth stage, it was carried out the empirical and mechanistic-empirical dimensioning of pavements with CSR, as well as it was performed the technical and costing analysis. The presented experimental results showed that the Cariri Stone Residue is technically and economically viable to construction of pavement granular layers.

Keywords: Cariri Stone. Residue. Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do Território da Região Metropolitana do Cariri (RMC)	20
Figura 2 - Mapa da pedologia da Região Metropolitana do Cariri.....	22
Figura 3 - Pilha de RPC.....	24
Figura 4 - Localização do APL Mineral da Região do Cariri/CE.	25
Figura 5 - Placas de Pedra Cariri de várias dimensões.....	27
Figura 6 - Parede externa de residência feita de RPC.	29
Figura 7 - Muro feito de RPC.....	30
Figura 8 - Calçada de residência feita de RPC no município de Santana do Cariri	30
Figura 9 - Equipamento de corte de placas da Pedra Cariri.	32
Figura 10 - Processo de extração e beneficiamento da Pedra Cariri.	33
Figura 11 - Quebra de placa no momento da extração.	34
Figura 12 - Exemplo de sobras destinadas ao descarte.	34
Figura 13 - Efluente formado da serragem de placas.	35
Figura 14 - Localização da coleta de resíduos da Pedra Cariri.	50
Figura 15 - Localização da coleta de resíduos da Pedra Cariri em relação ao Estado.	50
Figura 16 - Pilha de resíduos da Pedra Cariri na cidade de Nova Olinda da amostra coletada.	51
Figura 17 - Detalhes do solo de Nova Olinda coletado.....	51
Figura 18 - Detalhes do solo do Crato coletado.	52
Figura 19 - CBRs em processo de cura do RPC puro+5,5% de cimento.	59
Figura 20 - Corpos de prova do RPC puro+5,5% de cimento em processo de cura.	60
Figura 21 - Corpo de prova do RPC puro+5,5% de cimento submetido ao ensaio de RCS. ...	60
Figura 22 - Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga repetida.....	62
Figura 23 - Granulometria dos solos usados na estabilização com RPC.	65
Figura 24 - Enquadramento das curvas granulométricas das misturas com o solo de Nova Olinda e RPC.	65
Figura 25 - Enquadramento das curvas granulométricas das misturas de solo do Crato e RPC.	66
Figura 26 - Curvas de compactação das misturas de solo arenoso e RPC.	67
Figura 27 - Curvas de compactação das misturas de solo argiloso e RPC.....	68
Figura 28 - Análise granulométrica do RPC puro.	69
Figura 29 - Curva granulométrica do RPC puro com as faixas A, B, C e D do DNIT.	71

Figura 30 - Granulometria após-compactação dos materiais RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D e RPC puro.....	72
Figura 31 - Resultados do ensaio de azul de metileno para RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D e RPC puro.	74
Figura 32 - Curvas de compactação dos RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D e RPC puro.	79
Figura 33 - Superfícies das curvas dos diferentes RPCs para o caso do modelo composto....	82
Figura 34 - Procedimento de imersão, secagem superficial e rompimento dos CPs.....	84
Figura 35 - RCS para o RPC puro e RPC-B com teores de cimento de 2%, 5% e 7% para cura de 7 dias.	84
Figura 36 - Ilustração da realização do ensaio de RT (medição e rompimento) para o RPC puro+5,5% cimento	86
Figura 37 - Desenho esquemático da estrutura com RPC sem cimento para $N= 2 \times 10^6$	89
Figura 38 - Ilustração da estrutura com RPC com cimento para $N=7 \times 10^6$	90
Figura 39 - Ilustração da estrutura proposta para a base de RPC puro pelo método mecanístico-empírico para $N=2,5 \times 10^6$	91
Figura 40 - Tela do dimensionamento do pavimento de base de RPC puro pelo SISPAV.....	92
Figura 41 - Desenho esquemático da estrutura proposta para a base de RPC-B pelo método mecanístico-empírico.....	93
Figura 42 - Tela do dimensionamento do Pavimento da base de RPC-B pelo SISPAV.....	94
Figura 43 - Análise da viabilidade do Custo \times Distância de Transporte do RPC.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ocorrências da pedologia da Região do Cariri/CE.	21
Tabela 2 - Resultados das análises químicas médias dos componentes do calcário laminado.	28
Tabela 3 - Análise química dos resíduos da extração e beneficiamento da Pedra Cariri.	28
Tabela 4 - Quantidade de rejeito calculado por Vidal, Padilha e Oliveira (2006).	35
Tabela 5 - Resumo de alguns resíduos utilizados na área de pavimentação.	36
Tabela 6 - Nomenclatura das misturas usadas para a estabilização granulométrica.	54
Tabela 7 - Faixas A, B, C, D, E e F do DNIT para bases de pavimentos.....	54
Tabela 8 - Algumas características do agregado reciclado de resíduos sólidos da construção recomendados pela ABNT NBR 15115.	56
Tabela 9 - Resumo dos ensaios realizados nos solos locais da RMC	64
Tabela 10 - Resumo das densidades máximas secas das misturas e suas umidades ótimas.....	67
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de CBR e expansão para as misturas solo/RPC.	68
Tabela 12 - Análise química do RPC realizada pelo autor deste trabalho.	73
Tabela 13 - Resumo dos valores de Abrasão Los Angeles obtidos na literatura para alguns resíduos	75
Tabela 14 - Resultados da absorção do RPC para cada fração analisada.....	76
Tabela 15 - Resumo dos valores de absorção obtidos na literatura para alguns resíduos.	76
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de Proctor, CBR e expansão de RPC-A, B, C, D e puro.	78
Tabela 17 - Resumo de valores de parâmetro de modelagem e coeficientes de correlação para os RPCs.....	81
Tabela 18 - Parâmetros do modelo composto para os RPCs.....	82
Tabela 19 - Resultados da RCS para o RPC puro+5,5% de cimento nos tempos de cura de 1, 7 e 28 dias	85
Tabela 20 - Resultados da RT para o RPC puro+5,5% de cimento nos tempos de cura de 1, 7 e 28 dias.....	87
Tabela 21 - Valores de RT de misturas asfálticas investigadas no país.	87
Tabela 22 - Resultados do CBR e expansão para o RPC puro+5,5% de cimento nos tempos de cura de 1, 7 e 28 dias.	88
Tabela 23 - Dimensionamento empírico de pavimento com RPC sem cimento para $N= 2 \times 10^6$	89

Tabela 24 - Dimensionamento empírico de pavimento com RPC com cimento para $N=7 \times 10^6$.

.....90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIROCHAS	Associação Brasileira de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APL	Arranjo Produtivo Local
AASHTO	Association of State Highway and Transportation Officials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCP	Carbonato de Cálcio Precipitado
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CRAJUBAR	Crato, Juazeiro e Barbalha
C_u	Coefficiente de Uniformidade
DCP	Dynamic Cone Penetrometer
DER/CE	Departamento Estadual de Rodovias do Ceará
DERMU	Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiás
DMT	Distância Média de Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EVA	Espuma Vinílica Acetinada
IBACIP	Indústria Barbalhense de Cimento Portland
IG	Índice de grupo
INBOP	Indústria de Borrachas de Polímeros
IP	Índice de plasticidade
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
ITA	Instituto Tecnológico da Aeronáutica

LL	Limite de liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MARBRASA	Mármore e Granitos do Brasil
MEAS	Massa Específica Aparente Seca
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
PFP	Pó Fino de Polimento
PMF	Pré-Misturado a Frio
PTDRS	Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável e Solidário
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de Vinila
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RCS	Resistência à Compressão Simples
RMC	Região Metropolitana do Cariri
RPC	Resíduo da Pedra Cariri
RSPC	Resíduo de Serragem da Pedra Cariri
RT	Resistência à Tração
SCDP	Solo Contaminado por Derivados de Petróleo
SEINFRA	Secretaria da Infraestrutura
SMA	Stone Matrix Asphalt
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavement
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura
URCA	Universidade Regional do Cariri

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
\$	Dólar
σ_d	Tensão desvio aplicada no eixo axial
σ_1	Tensão principal maior
σ_3	Tensão principal menor
ε_R	Deformação específica axial resiliente
R^2	Coeficiente de determinação
k_1, k_2 e k_3	Parâmetros da regressão;
θ	Primeiro invariante de tensões
τ_{oct}	Tensão cisalhante octaédrica
$\gamma_{Sm\acute{a}x}$	Massa específica aparente seca máxima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações Iniciais	16
1.2	Problema de Pesquisa/Justificativa	17
1.3	Objetivos Geral e Específicos	17
1.4	Estrutura da Dissertação	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Considerações Iniciais	19
2.2	Caracterização Geral da Região Metropolitana do Cariri Cearense	19
2.2.1	<i>Aspectos geológicos da região de estudo</i>	20
2.2.2	<i>Pedologia da região de estudo</i>	21
2.3	Principais Resíduos Produzidos na Região Metropolitana do Cariri	22
2.4	Arranjo Produtivo Local da Pedra Cariri	24
2.5	Rochas Ornamentais	26
2.6	Pedra Cariri	27
2.6.1	<i>Caracterização Técnica da Pedra Cariri</i>	27
2.7	Produção da Pedra Cariri	31
2.8	Geração de RPC	33
2.9	Alguns Estudos sobre o Uso de Resíduos para Aplicação na Área de Pavimentação	35
2.9.1	<i>Resíduos de Rochas e Rochas Ornamentais</i>	36
2.10	Considerações Finais	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Escolha dos materiais	49
3.1.1	<i>Resíduo da Pedra Cariri (RPC)</i>	49
3.1.2	<i>Solos</i>	51
3.1.3	<i>Cimento</i>	52
3.2	Definição das Etapas da Pesquisa Experimental	52
3.2.1	<i>Primeira Etapa - Estabilização Granulométrica dos Solos com o RPC</i>	53
3.2.2	<i>Segunda Etapa - Avaliação do RPC Puro e Encaixados nas Curvas A, B, C e D do DNIT</i>	54
3.2.3	<i>Terceira Etapa - Estabilização Química do RPC com Cimento</i>	55

3.2.4.	<i>Quarta Etapa - Dimensionamento de Pavimentos com o Uso do RPC e Análise Técnica e de Custos</i>	55
3.3	Ensaio Realizados	56
3.3.1	<i>Análise Granulométrica e Índices Físicos</i>	56
3.3.2	<i>Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno</i>	57
3.3.3	<i>Ensaio de Absorção</i>	57
3.3.4	<i>Fluorescência de Raios-X</i>	57
3.3.5	<i>Abrasão Los Angeles</i>	57
3.3.6	<i>Índice de Forma do Agregado</i>	58
3.3.7	<i>Índice de Degradação após Compactação Proctor (IDp)</i>	58
3.3.8	<i>Compactação</i>	58
3.3.9	<i>Índice de Suporte Califórnia</i>	59
3.3.10	<i>Resistência à Compressão Simples (RCS)</i>	59
3.3.11	<i>Resistência à Tração (RT)</i>	60
3.3.12	<i>Módulo de Resiliência (MR)</i>	61
3.3	Considerações Finais	63
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	64
4.1	Considerações Iniciais	64
4.2	Resultados da Primeira Etapa - Estabilização Granulométrica dos Solos com o RPC	64
4.3	Resultados da Segunda Etapa - Avaliação do RPC Puro e Encaixados nas Curvas A, B, C e D do DNIT	69
4.3.1	<i>Análise Granulométrica</i>	69
4.3.2	<i>Resultados de Fluorescência de Raios X</i>	73
4.3.3.	<i>Adsorção de Azul de Metileno</i>	74
4.3.4	<i>Abrasão Los Angeles</i>	75
4.3.5	<i>Absorção</i>	76
4.3.6	<i>Índice de Forma</i>	77
4.3.7	<i>Índice de Compactação após Compactação Proctor</i>	77
4.3.8	<i>Resultados dos Ensaio Mecânicos dos RPC-A, B, C, D e Puro</i>	77
4.3.8.1	<i>Compactação, CBR e Expansão</i>	77
4.3.8.2	<i>Módulo de Resiliência (MR)</i>	80
4.4.	Resultados da Terceira Etapa - Estabilização Química do RPC com Cimento	83
4.4.1.	<i>Escolha do Teor Ótimo de Cimento e da Melhor Mistura com Cimento</i>	83

4.4.2. Resultados da RCS para o RPC puro + Teor Ótimo de Cimento (5,5%)	85
4.4.3. Resultados da RT para o RPC puro + Teor Ótimo de Cimento (5,5%)	86
4.4.4. Resultados do CBR e Expansão para o RPC puro + Teor Ótimo de Cimento (5,5%)	87
4.5. Resultados da Quarta Etapa - Dimensionamento de Pavimentos com o Uso do RPC e Análise Técnica e de Custo	88
4.5.1. Método Empírico do CBR	88
4.5.2. Método Mecânico-Empírico	90
4.5.3 Análise Técnica e de Custo	94
4.6 Considerações Finais	96
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	97
5.1 Considerações Iniciais	97
5.2 Principais Conclusões	97
5.3 Sugestões para trabalhos futuros	98
REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A geração de resíduos é uma etapa pertinente a qualquer processo produtivo e isso causa preocupação a nível mundial sobre o gerenciamento dos mesmos, assim como campanhas, debates e a fomentação de políticas sobre o seu tratamento, como é o caso da lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil. Os resíduos sólidos são restos oriundos das atividades humanas ou de processos industriais e dependendo do tipo de produto, eles podem ser altamente nocivos à natureza, caso não destinados adequadamente podem vir a poluir o solo, a água e o ar.

O consumo de matérias-primas é outro problema que preocupa ambientalistas do mundo todo, por isso, atualmente, se pesquisam atividades autossustentáveis a fim de melhorar os processos produtivos em todas as áreas possíveis.

Para a construção de obras na pavimentação são necessários vários materiais como: ligante asfáltico, materiais pétreos, materiais terrosos, cimento, cal, dentre outros. Alguns desses materiais podem ser encontrados nas proximidades dos locais da obra e estes podem estar fora das especificações das normas.

Para materiais fora das especificações, geralmente, se utiliza o processo de estabilização. A estabilização é um processo de melhoramento dos materiais e muitas dessas soluções (incorporação de brita, cimento, cal, ligante, etc.) podem aumentar os custos da obra rodoviária. A incorporação de resíduos aparece como opção no processo de estabilização e como ajuda na solução de impactos ambientais.

A incorporação de resíduos é uma realidade na área da pavimentação, tendo em vista a possibilidade do consumo de grandes volumes de materiais em suas camadas. O tema estimula o estudo de vários tipos de resíduos.

Os grandes centros urbanos concentram grande parte dos resíduos produzidos e muitas vezes não têm uma destinação adequada. Na presente pesquisa, será estudado o Resíduo da Pedra Cariri (RPC), produzido na Região Metropolitana do Cariri (RMC), como material alternativo para ser incorporado em camadas granulares dos pavimentos.

1.2 Problema de Pesquisa/Justificativa

No processo de extração e beneficiamento da Pedra Cariri há desperdício de material de cerca de 70%, o que gera a formação de grandes pilhas que ficam armazenadas no local. Esse volume causa impactos ambientais como: acúmulo de entulho, assoreamento de córregos, obstrução de drenos e impacto visual desagradável (VIDAL, PADILHA E OLIVEIRA, 2005).

O problema de pesquisa que motivou a execução deste trabalho é o acúmulo de um considerável volume de resíduos originados no local, cerca de 1 milhão de metros cúbicos, que é pouco aproveitado na área de engenharia. Associado a este problema, tem-se a dificuldade de se encontrar materiais que atendam às especificações vigentes para aplicação na área rodoviária da RMC o que resulta frequentemente na busca de materiais alternativos.

1.3 Objetivos Geral e Específicos

O objetivo geral da presente investigação foi investigar a viabilidade técnica e econômica do emprego do Resíduo Pedra Cariri em camadas granulares dos pavimentos.

Os objetivos específicos estabelecidos foram:

- a) avaliar o uso do RPC em processo de estabilização granulométrica e/ou química;
- b) conhecer o comportamento mecânico do RPC puro para aplicação na área de pavimentação;
- c) compor curvas granulométricas baseadas nas curvas médias das faixas estabilizadas de base do DNIT e avaliar seu comportamento mecânico;
- d) realizar uma avaliação de custo prévia do RPC como material alternativo na construção de camadas de pavimento;
- e) propor, se possível, uma estrutura de pavimento para a RMC contendo o RPC nas camadas granulares.

1.4 Estrutura da Dissertação

Além do capítulo 1 aqui descrito, a dissertação é composta dos seguintes capítulos:

- a) capítulo 2: foi escrita a revisão bibliográfica que consta de informações da literatura nacional e internacional sobre o uso de resíduos na pavimentação;
- b) capítulo 3: estão apresentados os materiais e métodos usados para a elaboração da presente pesquisa;
- c) capítulo 4: são apresentados e analisados os resultados do programa experimental estabelecido;
- d) capítulo 5: são apresentadas as principais conclusões da pesquisa desenvolvida, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem a finalidade de reunir informações sobre o reuso de resíduos na área da pavimentação, reuso de resíduos de rochas ornamentais, assim como de rochas em geral, tanto na área da pavimentação como em outras áreas. Será realizada uma breve descrição da Região Metropolitana do Cariri (RMC) e os principais resíduos que nela são gerados.

2.2 Caracterização Geral da Região Metropolitana do Cariri Cearense

A Região Metropolitana do Cariri (RMC), antigo CRAJUBAR, está localizada no estado brasileiro do Ceará. A região metropolitana surgiu a partir da junção entre os municípios de Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha, chamada triângulo CRAJUBAR. A RMC foi criada por uma Lei Complementar Estadual nº 78 sancionada em 29 de junho de 2009. Adicionando-se a eles, foram incluídas as cidades vizinhas situadas no Cariri cearense: Caririaçu, Farias Brito, Jardim, Missão Velha, Nova Olinda, Santana do Cariri e Várzea Alegre somando um total de 9 municípios. A RMC está localizada na região sul do Ceará e é a região da divisa entre o Ceará e os estados de Pernambuco, Paraíba e Piauí. A região pode ser vista na Figura 1.

Figura 1 - Mapa do Território da Região Metropolitana do Cariri (RMC)



Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará - IPECE (2009).

2.2.1 Aspectos geológicos da região de estudo

No sul do Estado do Ceará, na região da Chapada do Araripe, há a Formação Santana, onde se encontra um calcário laminado (VIDAL; CAMPOS *et al.*, 2009). A Bacia do Araripe é a maior das bacias sedimentares interiores do Brasil e não se limita territorialmente apenas à Chapada do Araripe, mas estende-se ao Vale do Cariri, com uma área total de 9000 km².

O CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), a partir de 2006, realizou uma série de estudos e pesquisas na Região de Cariri (10 relatórios técnicos, duas dissertações de mestrado, duas monografias, de números 75 e 86, nas Séries Estudos e Documentos e Tecnologia Mineral) e criou o APL (Arranjo Produtivo Local) mineral do Cariri com a ajuda do Governo Federal. Esse APL corresponde aos municípios de Santana do Cariri, Nova Olinda, Altaneira e Farias Brito.

A Formação Santana (à qual pertencem os calcários do Cariri, objeto de estudo) é a mais complexa e a mais estudada, não só pelos extensos depósitos de gipsita e calcário que apresenta, mas também porque é um dos principais sítios paleontológicos do Brasil,

conhecido internacionalmente, por causa do estado de conservação de seus espécimes e pela grande variedade deles (VIDAL *et al.*, 2008).

2.2.2 Pedologia da região de estudo

Para auxiliar na avaliação do RPC em processo de estabilização granulométrica e na escolha do solo foi realizado um levantamento sobre a pedologia da região com o intuito de se conhecer o tipo de solo a ser trabalhado nas misturas.

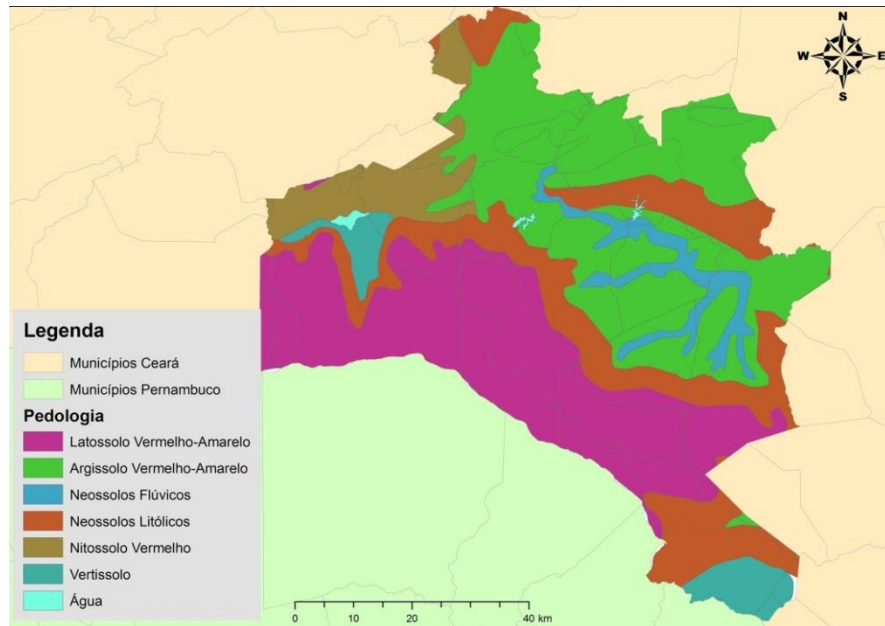
Segundo Mascarenhas (2015), os solos predominantes na Região Metropolitana do Cariri são: Latossolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Flúvicos, Neossolos Litólicos, Nitossolo Vermelho e Vertissolo, conforme observado na Figura 2. A ocorrência percentual da pedologia da RMC está disposta na Tabela 1.

Tabela 1 - Ocorrências da pedologia da Região do Cariri/CE.

Pedologia	Área (km²)	Ocorrência (%)
Latossolo vermelho-amarelo	1.504,77	30,46
Argissolo vermelho-amarelo	1.682,93	34,06
Neossolos flúvicos	219,87	4,45
Neossolos litólicos	992,90	20,10
Nitossolo vermelho	331,73	6,71
Vertissolo	191,59	3,88
Água	16,76	0,34

Fonte: Mascarenhas (2015)

Figura 2 - Mapa da pedologia da Região Metropolitana do Cariri.



Fonte: Mascarenhas (2015)

2.3 Principais Resíduos Produzidos na Região Metropolitana do Cariri

Além dos resíduos sólidos urbanos (RSU), RCD e outros, a RMC se destaca por um APL calçadista. Sendo assim, há geração de resíduos do tipo: EVA (espuma vinílica acetinada), restos de cola, tecidos usados entre outros. Este APL ocupa posição de destaque na economia da RMC, no Ceará, principalmente nas cidades de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha, formando o eixo CRAJUBAR.

Sobre os resíduos produzidos pelo polo calçadista, os gestores afirmaram utilizar no seu processo produtivo basicamente: sintético, borracha (EVA), cola, papelão, solados de PU (Poliuretano) e PVC (Policloreto de Vinila), tecidos, sendo o sintético e a borracha os principais geradores de resíduo (PORTO, 2013).

Não se tem ao certo a quantidade de produtores de calçados na RMC e o que existe são perspectivas e aproximações geradas pelos órgãos controladores e que estudam o setor. Isto se deve, principalmente, ao fato de existirem muitos fabricantes na informalidade, sem nenhum registro que possa identificá-los em um mapeamento, o que se torna um agravante na falta de articulação do arranjo (PORTO, 2013).

Foram pesquisadas pelo presente autor, as empresas Via Show, Mikalce, New Way, INBOP (Indústria de Borrachas e Polímeros) e Via Beach, todas situadas na cidade de Juazeiro do Norte. Das empresas citadas, a empresa Via Beach produz a sua matéria-prima

(EVA) e a recicla na forma de nova matéria-prima. A Via Beach fornece material para a empresa New Way, a qual tem desconto pelos rejeitos de EVA produzidos e retornados. A empresa INBOP também tem um sistema de reaproveitamento de EVA, no entanto, o EVA que não possui demanda considerável fica acumulado na fábrica. A empresa Via Show, que atende também pelo nome de Estylosa, paga para reciclar seus rejeitos (retornam como matéria-prima), tendo uma produção de aproximadamente 4 toneladas/mês de EVA.

Outros tipos de resíduos da RMC são provenientes de olarias que produzem telhas, blocos e tijolos. No processo de fabricação ocorre perda de peças pela quebra, trinca e queima das mesmas. Existem estudos desses resíduos como o de Macêdo *et al.* (2012) que analisaram quimicamente os mesmos. Esses autores testaram preliminarmente esses resíduos em uma matriz cerâmica como forma de reaproveitamento e afirmaram que estes possuem potencialidade de uso.

Alencar-Linard, Lima e Saeed-Khan (2015) afirmam que a perda em média das indústrias ceramistas do município do Crato é de 2,1% e que os resíduos são reaproveitados ora ao processo produtivo, ora para recuperar áreas degradadas ou para aplainar terrenos. Ainda segundo esses autores, o resíduo é utilizado para pavimentar estradas carroçáveis e pavimentar áreas ao redor da indústria.

A RMC possui, também, um APL mineral, cujo resíduo é o objeto de estudo deste trabalho. Esse APL mineral trabalha com calcário laminado, chamado de Pedra Cariri, que se situa nas cidades de Nova Olinda e Santana do Cariri, e um calcário cristalino situado nas cidades de Altaneira e Farias Brito.

Segundo observações pessoais do presente autor, existe um trabalho de extração de rochas ornamentais (calcário laminado) para diversos usos na construção civil. Nesta etapa de extração são produzidos muitos resíduos, que estão ilustrados na Figura 3.

A produção comercial é medida em metros quadrados enquanto os resíduos são medidos em volume ou peso. Dos resíduos que se tem registro da RMC, a Pedra Cariri, provavelmente, é a de maior volume da região. Segundo Vidal, Padilha e Oliveira (2006) a produção mensal (produto comercializado) é estimada em 20 mil metros quadrados, sendo que 70% é perdido em resíduo.

Figura 3 - Pilha de RPC.



Fonte: Próprio autor.

Segundo Vidal, Padilha e Oliveira (2006), a reserva de calcário possui 97 milhões de metros cúbicos de material, equivalente a 241 milhões de toneladas, abrangendo principalmente os municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri.

2.4 Arranjo Produtivo Local da Pedra Cariri

Segundo Vidal *et al.* (2008) para evitar extração clandestina ou irregular, o governo federal desenvolveu um projeto cooperativo para apoiar pequenos produtores: o APL da Pedra Cariri, a localização do APL é ilustrada na Figura 4.

Figura 4 - Localização do APL Mineral da Região do Cariri/CE.



Fonte: Vidal *et al.* (2008).

Outro fato importante sobre a área descrita é a existência de um parque na floresta do Araripe, este foi o primeiro Parque Natural protegido por lei no país, com 38.262 hectares e criado em 1946 pelo Decreto-Lei 9226. Esse parque está sob administração federal, e em 2006 a UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura) aceitou o Geoparque Araripe como parte integrante de seus Geoparks mundiais. A Universidade Regional do Cariri (URCA) dirige esse projeto e junto com o Museu Paleontológico, que fica na cidade de Santana do Cariri, auxiliam os moradores sobre a importância e consciência paleontológica dos fósseis da região, o que contribui para a mineração, o turismo e a academia.

Por causa dessas singularidades que tornam a região importante houve a preocupação do governo em fomentar o projeto de auxílio a um desenvolvimento sustentável da mineração de calcário na região, coexistindo pacificamente com o turismo e a pesquisa científica. O CETEM foi solicitado a coordenar e dar suporte a alguns APLs do Brasil, dos quais o APL dos Calcários do Cariri fez parte de 2005 a 2009.

Conclui-se que mesmo com a importância histórica e científica, a fiscalização e a ajuda aos mineradores da região, a deposição de rejeitos constitui um problema ambiental que está longe de ser resolvido. Apesar do interesse do Governo Federal, ainda há muito que

se fazer, tanto em obras de preservação das áreas, como em estudos sobre a região, estudos ambientais sobre o impacto do RPC e projetos de reaproveitamento desse resíduo.

2.5 Rochas Ornamentais

De acordo com a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) (2003) de NBR (Norma Brasileira) número 15.012, a rocha ornamental é um material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamentos, utilizado para exercer uma função estética. A rocha ornamental, conforme citado pelo Manual de Rochas Ornamentais (2013), geralmente, é utilizada no acabamento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas de obras de construção civil.

Mattos (2002) destaca que a rocha ornamental deve apresentar beleza estética, isso significa que esta deve ter homogeneidade de textura e estrutural, e ainda possuir características tecnológicas dentro de padrões aceitáveis das normas técnicas brasileiras. Segundo a Associação Brasileira de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2016), o mercado de rochas ornamentais tem uma movimentação de capital considerável. Até maio de 2016, somou-se um total de US\$ 471.936.869,00 em exportações e US\$ 12.471.039,00 em importações, ficando com um saldo de US\$ 459.465.830,00.

Dantas (2008) afirma que o Brasil é um dos maiores produtores de rochas ornamentais do mundo, extraíndo cerca de 5,2 milhões de toneladas/ano. No entanto, a produção de rejeito chega a 40% do valor total dessa produção. Segundo esse autor, os estados mais destacados na produção de blocos ou produtos acabados são os estados do Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia, correspondentes a 80 % da produção nacional.

A Pedra Cariri como rocha ornamental tem importância econômica destacada nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri. Segundo notícia publicada em 2013, pelo *Diário do Nordeste*, a exploração de calcário tornou o Cariri como um polo mineral do nordeste. Somente o município de Nova Olinda movimenta R\$ 12 milhões por ano. Essa extração, ainda segundo o jornal, é feita há mais de 3 décadas, sendo que o metro quadrado custa em torno de R\$ 10,00 e os preços podem variar de acordo com o tipo de pedra.

Na mina visitada para o presente estudo, verificou-se que o processo é semimecanizado e utiliza uma máquina de corte elétrica. As placas são então conduzidas para a serraria, onde podem ficar com as seguintes dimensões: 40 × 40 cm; 50 × 50 cm; 30 × 30 cm; 20 × 20 cm e 15 × 30 cm conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Placas de Pedra Cariri de várias dimensões.



Fonte: próprio autor

2.6 Pedra Cariri

A Pedra Cariri é uma rocha sedimentar rica em calcário. Segundo Sampaio e Almeida (2005), a rocha calcária é utilizada para a obtenção de blocos, material para agregados, cimento, cal e até rochas ornamentais. O calcário da Pedra Cariri é chamado de calcário laminado, é utilizado na construção civil em forma de revestimento de pisos e fachadas e possui cor amarela ou azulada. O tópico seguinte abordará características serão a respeito da Pedra Cariri, como: aspectos tecnológicos e o tipo de reaproveitamento a que está submetido o rejeito.

2.6.1 Caracterização Técnica da Pedra Cariri

Correia, Vidal e Ribeiro (2006) fizeram uma análise química média dos componentes do calcário laminado e do cristalino da região que está apresentada na Tabela 2. As amostras de Nova Olinda e Santana do Cariri são de calcário laminado e as amostras de Altaneira e Farias Brito são de calcário cristalino.

Tabela 2 - Resultados das análises químicas médias dos componentes do calcário laminado.

Amostras	Teor (%)										
	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CuO	K ₂ O	SO ₃	SrO	MnO	P ₂ O ₅
Nova Olinda	53,9	0,78	1,16	0,270	0,810	0,027	0,041	0,046	0,069	0,19	0,045
Santana do Cariri	54,0	0,88	0,44	0,089	0,490	0,019	0,024	0,146	0,071	0,18	0,058
Altaneira	44,3	6,84	4,36	0,281	0,302	-	0,112	-	0,312	0,01	-
Farias Brito	46,2	5,87	2,26	0,287	0,312	-	0,085	-	0,272	0,01	-

Fonte: Correia, Vidal e Ribeiro (2006).

Analisou-se tanto o calcário laminado quanto o calcário cristalino. O calcário de Nova Olinda e Santana do Cariri apresentou maiores teores de CaO, enquanto que o calcário cristalino apresentou maiores teores de MgO. O calcário laminado difere do cristalino nos teores de óxido de cálcio e de óxido de magnésio. O calcário cristalino possui uma elevada resistência à compressão e porosidade baixa, enquanto, o calcário laminado possui menor resistência e maior porosidade.

Suassuna, Brasileiro e Prado (2012) realizaram caracterização química e mineralógica do RPC e do resíduo do pó da serraria. Os resultados da análise química por fluorescência de raios X, como ilustrado na Tabela 3, mostram que os resíduos de serraria e resíduos comuns são fontes de calcita de alta pureza (cerca de 94% a 96%), indicando que esses podem ser usados em diversas aplicações industriais e agrícolas. Não há registro do local exato da pedreira visitada no trabalho de Suassuna, Brasileiro e Prado (2012), somente que o calcário testado em sua pesquisa foi o calcário laminado, Pedra Cariri.

Tabela 3 - Análise química dos resíduos da extração e beneficiamento da Pedra Cariri.

Óxidos	Resíduo do pó da serraria da pedra cariri (%)	RPC (%)
SiO ₂	1,96	2,05
Al ₂ O ₃	0,00	1,00
CaO	95,51	95,03
MgO	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	1,59	1,23
K ₂ O	0,23	0,00
MnO	0,45	0,45
TiO ₂	0,00	0,00

Fonte: Adaptado de Suassuna, Brasileiro e Prado. (2012).

O uso mais nobre do RPC é na indústria de cimento, segundo Vidal, Padilha e Oliveira (2006), em que a IBACIP (Indústria Barbalhense de Cimento Portland) coleta cerca de 7000 ton/mês, ao custo de R\$ 0,20/tonelada. O presente autor verificou, por meio de entrevistas realizadas, que o rejeito já foi empregado localmente para revestimento primário. Esse uso é reiterado por Correia, Vidal e Ribeiro (2006) ao afirmar que o RPC é usado para melhoria de estradas vicinais nos períodos chuvosos. A empresa Coral utilizou rejeito de calcário laminado na camada de reforço de subleito em alguns trechos da rodovia CE 166 que liga o município de Santana do Cariri e Nova Olinda no ano de 2010 (PINTO, 2011).

A empresa Comol, responsável por prestar serviços ao DER/CE (Departamento Estadual de Rodovias do Ceará), que realizava as fiscalizações nas obras supracitadas, informou que o material utilizado foi rejeito de calcário laminado puro e sem qualquer alteração das suas características observadas no local de extração. A energia de compactação utilizada para determinar a umidade ótima foi a intermediária, o CBR avaliado foi de 30% e a expansão foi de 1%. O diâmetro do material de rejeito aplicado teve como dimensão máxima 19,1mm, ou seja, o material passado na peneira ¾” foi totalmente aproveitado para tal finalidade conforme explicitado em Pinto (2011).

O presente autor evidenciou outros usos para o RPC, durante visita realizada à cidade de Santana do Cariri em 2015. Algumas residências utilizaram o RPC na forma de tijolos para alvenaria, como pode ser visto na Figura 6. A construção tem um aspecto rústico e artesanal pela sobreposição dos tijolos desiguais de RPC.

Figura 6 - Parede externa de residência feita de RPC.



Fonte: Próprio autor

Como já visto, o RPC é usado para construção de paredes e muros. Durante a visita, o presente autor percebeu um muro que pode ter sido a parede de uma antiga residência

(ver Figura 7). Outra evidência do uso de RPC foi numa calçada de outra residência também no município de Santana do Cariri. O RPC serviu de base para a calçada, usado como tijolos unidos aparentemente por uma argamassa comum de cimento, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 7 - Muro feito de RPC.



Fonte: Próprio autor.

Figura 8 - Calçada de residência feita de RPC no município de Santana do Cariri



Fonte: Próprio autor.

Correia, Vidal e Ribeiro (2006) afirmaram que, de acordo com os padrões qualitativos para a indústria de Minérios Carbonáticos Calcíticos e segundo a caracterização tecnológica do RPC, os calcários da RMC podem ser usados em diversas aplicações industriais, se efetuados mais ensaios específicos com o rejeito. Uma das aplicações possíveis

mais promissora, segundo tais autores é a obtenção do Carbonato de Cálcio Precipitado (CCP) usado na fabricação de tintas, borrachas, plásticos, neutralização de ácidos, entre outros.

Os autores informam ainda que, antes de se utilizar os rejeitos do calcário laminado, deve-se checar a presença de fósseis devido sua importância científica para a paleontologia, de forma a evitar a perda de exemplares.

2.7 Produção da Pedra Cariri

A extração da Pedra Cariri é feita a partir da retirada da camada de solo e das camadas de calcário intemperizado. Em seguida, máquinas com discos diamantados fazem cortes verticais e o deslocamento das lajotas é manual. Geralmente, a espessura da camada aproveitada como Pedra Cariri é cerca de 3 metros e, da camada inerte, 7 metros.

Maquinário pesado retira a vegetação, camadas argilosas e o calcário intemperizado. Esse volume de material depende de cada afloramento, em alguns casos o capeamento é da ordem centimétrica, atingindo-se logo a rocha sã; em outras atinge cerca de 10 a 15 metros.

O avanço da frente de lavra ocorre de fora para dentro, de cima para baixo, segundo Vidal, Padilha e Oliveira (2006). O material não aproveitável (material friável, sobras e placas arqueadas) é retirado manualmente ou por meio de carrinho de mão e empilhado próximo da frente de lavra.

Ainda conforme Vidal, Padilha e Oliveira (2006) a maioria dos produtores utiliza, atualmente, a tecnologia semimecanizada, a qual também é utilizada na pedreira visitada, onde utilizam-se máquinas de corte acopladas com disco diamantado, acionadas por eletricidade. Como os calcários estão dispostos horizontalmente, primeiro são realizados cortes verticais, fazendo um desenho em quadrículas de 50×50 cm, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Equipamento de corte de placas da Pedra Cariri.



Fonte: Próprio autor.

O diâmetro do disco varia de 350 mm a 500 mm, permitindo um corte com profundidade em lajotas de calcário que não ultrapassem a espessura de 18 cm. Em seguida, com uma alavanca, essas lajotas são retiradas manualmente. As lajotas são esquadrejadas, num local específico, em dimensões compatíveis à sua aplicação, geralmente se enquadrando nas seguintes especificações 50 × 50 cm, 40 × 40 cm, 30 × 30 cm, 20 × 20 cm e 15 × 30 cm ou em placas de 15 × 15 cm. O esquema de extração pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10 - Processo de extração e beneficiamento da Pedra Cariri. (a) Extração de camadas de solo até atingir afloramento; (b) Retirada manual da lajota; (c) Início do deslocamento manual da lajota; (d) Término do deslocamento manual (e) Esquadrejamento nas dimensões comerciais.



Fonte: Próprio autor.

Importante salientar que as placas contendo fósseis de importância (onde os produtores já foram treinados durante as atividades do APL) são encaminhadas para o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), órgão responsável pelos direitos minerários e pelos fósseis no país (VIDAL, PADILHA E OLIVEIRA, 2006).

2.8 Geração de RPC

Os resíduos são produzidos nas etapas de extração e de corte. Na extração algumas placas podem se quebrar durante seu manuseio, conforme testemunhado pelo presente autor durante uma visita (ver Figura 11).

Figura 11 - Quebra de placa no momento da extração.



Fonte: Próprio autor

A serragem das placas para enquadrar nos tamanhos comerciais gera resíduos em forma de sobras que não tem valor comercial, conforme ilustrado na Figura 12. Outro resíduo gerado na produção é o do pó da serragem, geralmente misturado com água, e dessa mistura resulta um efluente, conforme pode ser observado na Figura 13. De acordo com entrevista feita ao proprietário da pedreira visitada, não existe uma área em especial destinada ao despejo do RPC.

Estima-se que a quantidade de rejeitos produzida na RPC é cerca de 1 milhão de m^3 para os municípios da área de estudo. Calculando de forma aproximada, o volume apresentado na Tabela 4 seria suficiente para a construção de 644 km de rodovia que apresentasse base granular de 20 cm de espessura deste material e largura de plataforma de 8 m.

Figura 12 - Exemplo de sobras destinadas ao descarte.



Fonte: Próprio autor.

Figura 13 - Efluente formado da serragem de placas.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 - Quantidade de rejeito calculado por Vidal, Padilha e Oliveira (2006).

Municípios	Volume (m ³)
Nova Olinda	755.000,00
Santana do Cariri	275.000,00
Total	1.030.000,00

Fonte: Adaptado de Vidal, Padilha e Oliveira (2006).

2.9 Alguns Estudos sobre o Uso de Resíduos para Aplicação na Área de Pavimentação

Dos anos 2000 até o presente momento, a preocupação com o meio ambiente e a autossustentabilidade vêm crescendo. Vários estudos já foram realizados na tentativa de reutilizar resíduos, por exemplo, na área da Engenharia Civil.

Pela grande quantidade de trabalhos, tanto nacionais como internacionais, sobre aplicação de resíduos na área da pavimentação, seria tarefa extremamente difícil expor todos. Portanto, de forma resumida apresenta-se a Tabela 5 contendo alguns trabalhos sobre o uso de resíduos na área da pavimentação.

Tabela 5 - Resumo de alguns resíduos utilizados na área de pavimentação.

Tipo de Resíduo	Finalidade	Referência Bibliográfica
RCD – Resíduo de Construção e Demolição	Estabilização química	Lima J. (2008)
	Estabilização granulométrica	Silva (2009); Abdou e Bernucci (2005)
	Agregado para asfalto-borracha - CBUQ	Quiñones (2014)
	Agregado alternativo de misturas asfálticas	Lobo (2013)
Escória de aciaria	Lastro ferroviário	Sousa (2007)
	Estabilização granulométrica	Parente, Boavista e Soares (2003)
	Tratamento superficial	Loiola (2009)
	Mistura asfáltica descontínua, tipo SMA – Stone Matrix Asphalt	Tavares, Motta e Oda (2011)
Fresado	Estabilização granulométrica	Pinto (2010)
Borracha de pneu moída	Modificação de ligante	Specht (2004); Lima (2008)
Areia de fundição	Estabilização granulométrica	Klinsky <i>et al.</i> (2012); Domingues <i>et al.</i> (2014)
	Substituição ao agregado fino em misturas asfálticas	Costa <i>et al.</i> (2011)
	Misturas asfálticas densas	Coutinho (2004)
Cinzas	Estabilização química	Vizcarra (2010); Silveira, Silva e Guimarães (2013)
	Estabilização química com cal	Farias (2005)
SCDP – Solo Contaminado por Derivados de Petróleo	Estabilização granulométrica/química	Barros, Cavalcante e Barroso (2013)
Lodo de ETA e ETE	Estabilização química/granulométrica	Lucena (2012)
Fibras de coco	Mistura asfáltica descontínua, tipo SMA	Vale (2007)
Fosfogesso	Estabilização granulométrica	Mesquita e Rezende (2005)

Fonte: Próprio autor.

2.9.1 Resíduos de Rochas e Rochas Ornamentais

Os rejeitos de rochas comuns ou ornamentais têm seu reuso na engenharia, na indústria, na construção civil e outros. Segundo Campos *et al.* (2009), esses rejeitos podem ser aplicados em diversas formas: os efluentes - recirculação da água e aplicação industrial; resíduos finos de rocha - argamassas, cerâmicas vermelhas, vidro, tintas, bloquetes, manilhas, corretivos de solos; resíduos grossos - fábrica de cimento, brita e areia artificial, artesanatos, seixos ornamentais, bijuterias, degraus de escada, muros de contenção de taludes, meio-fio, pavimentação, filetes para muros, etc.

Gonçalves (2000) utilizou resíduo do corte do granito como adição para produção de concretos. No trabalho foi realizada a caracterização química, física e de risco ambiental do resíduo e para as misturas, compressão simples, compressão diametral, etc. Eles misturaram massas nos teores de 10% e 20% em relação à massa de cimento, o resíduo tinha granulometria de material fino. A análise do autor indicou que: (a) o resíduo não apresentou riscos ambientais; (b) a sua utilização em concretos é viável tecnicamente e (c) 10% de adição é o teor que mostrou o melhor desempenho.

Moura, Gonçalves e Leite (2002) usaram o resíduo de corte de mármore e granito e misturaram em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. Esses autores utilizaram os resíduos em forma de agregado miúdo para argamassa de revestimento e produção de lajotas pré-moldadas para piso. A análise dos resultados permitiu concluir que o resíduo não apresentou riscos ambientais e que sua utilização, em até 10%, como agregado miúdo para argamassa de revestimento, é tecnicamente viável, bem como na produção de lajotas. Dos resultados tem-se, por exemplo, a argamassa para pisos que ficou na proporção de 1:0,5:0,5 (cimento, resíduos e areia siltosa) com 17,7 MPa de RCS aos 28 dias de cura.

Carvalho *et al.* (2003) pesquisaram sobre o aproveitamento do resíduo fino das serrarias de Santo Antônio de Pádua, no Rio de Janeiro. Os resíduos são de rocha Miracema (rocha de baixa absorção e aparência rústica) e rocha madeira (rocha de pigmentação semelhante à textura de algumas madeiras), ambas ornamentais. Os resíduos já eram reutilizados na forma de tijolos e bloquetes, porém essa reutilização era limitada à pequena demanda na região. A pesquisa revelou a possibilidade de se usar o fino em cerâmica vermelha e em argamassa comum e colante. O acréscimo do resíduo (até 30%) à cerâmica vermelha resultou em perdas ao fogo reduzidas em 25%, redução na plasticidade e diminuição na quantidade de água.

Moreira, Manhães e Holanda (2005) reaproveitaram resíduo de rocha ornamental proveniente do Noroeste Fluminense em cerâmica vermelha. Prepararam uma série de misturas argila/resíduo contendo até 20% em peso de rocha ornamental. O resíduo, do tipo gnaiss, foi provido por uma empresa em Santo Antonio de Pádua/RJ e o material argiloso proveniente da região de Campos dos Goytacazes/RJ. Os resultados experimentais indicaram que o resíduo de rocha ornamental do tipo gnaiss pode ser utilizado como matéria-prima na formulação de massa argilosa para a fabricação de cerâmica vermelha.

Pontes e Stellin Júnior (2005) utilizaram resíduos de rochas ornamentais na indústria da construção civil. As amostras de resíduos são provenientes de teares de serraria de blocos de mármore e granito, do município de Cachoeira de Itapemirim/ES, da empresa

Mármore e Granitos do Brasil (MARBRASA). A pesquisa buscou reduzir a quantidade de ferro (Fe) do resíduo da serraria (pó) para sua utilização na indústria da cerâmica, como também na cerâmica vermelha para produção de tijolos, telhas e lajotas. Segundo os autores, existe viabilidade técnica de se retirar até 75% de Fe do resíduo, mas não mencionaram viabilidade econômica. Os estudos de aplicações industriais na construção civil foram considerados promissores.

Rezende, Marson e Vertamatti (2006) trabalharam com material estéril resultante da exploração de calcário em pavimentação de baixo custo para estradas não pavimentadas. O material estéril foi um calcário pobre em carbonato e biotita/gnaiss. Para a avaliação da capacidade de suporte, foi escolhido um trecho em execução de uma rodovia vicinal pela prefeitura municipal de Taubaté e foi utilizado o equipamento DCP (Dynamic Cone Penetrometer) do ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica) que determina o CBR *in situ*. Segundo os autores, os valores de CBR permitem usar o material em camadas de sub-base. Os valores de CBR encontrados foram correlacionados e ficaram em torno de 30%.

Mello (2006) fez pesquisa sobre a utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha. Ele coletou 12 amostras de marmorarias da grande São Paul, no entanto, somente 4 foram escolhidas devido suas características distintas. O argilito foi escolhido como matéria-prima para confecção da massa padrão de cerâmica vermelha. Alguns testes foram realizados para a caracterização dos materiais como: análise mineralógica, difração por raios X entre outros. Os resultados apontaram viabilidade técnica do uso desses resíduos, porém com algumas ressalvas, por exemplo, às lamas provenientes de granito foi indicada a incorporação em até 40% e às de mármore 16%, por causa da queda de desempenho, porque os resíduos não possuem poder de cimentação.

Moura *et al.* (2006) estudaram a produção de pisos intertravados com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais. Os resíduos são de mármore e granito oriundos de uma pedreira de Feira de Santana e uma empresa do estado do Espírito Santo. Os resultados indicaram o uso do resíduo como boa alternativa para a minimização de impactos e como material suplementar na produção de concretos para peças de pavimentação. O uso de até 10% de resíduo melhorou o comportamento mecânico (RCS) das peças.

Carvalho, Ribeiro e Carrisso (2006) utilizaram o rejeito do corte do granito em pavimentação. O objetivo do trabalho foi verificar a potencialidade do uso de um rejeito mineral granítico em substituição aos agregados utilizados em misturas asfálticas. O rejeito foi oriundo de uma pedreira localizada em Medeiros Neto/BA. Eles realizaram testes de

granulometria, densidade, abrasão, adesividade, etc. Dos resultados, os autores puderam concluir que o resíduo pode ser empregado em pavimentação asfáltica, obtendo, por exemplo, valores de resistência mecânica (razão de resistência à tração) acima de 80%, no padrão Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE).

Ribeiro *et al.* (2007a) realizaram estudos sobre o uso do calcário do Cariri cearense (calcário cristalino) como agregado mineral em pavimentação asfáltica. O calcário utilizado na pesquisa foi proveniente de Farias Brito/CE. Fizeram ensaios de granulometria, abrasão Los Angeles, índice de forma, densidade real e aparente, dureza, desgaste e outros. Pelos resultados, os autores concluíram que apesar dos bons resultados de resistência mecânica dos agregados, nenhuma das misturas asfálticas testadas atendeu às especificações requeridas, por exemplo no ensaio Lottman e no ensaio de adesividade, impedindo seu uso na pavimentação, possivelmente devido aos problemas de adesividade que poderiam, segundo os autores, ser corrigida com o uso de *doping*.

Braga Filho, Araújo e Soares (2006) realizaram uma pesquisa substituindo os agregados tradicionais de misturas asfálticas por rejeitos de calcário cristalino das cidades de Farias Brito e Altaneira para uma análise mecânica. As misturas asfálticas foram realizadas para rodovias de baixo volume de tráfego. O objetivo da pesquisa foi avaliar a potencialidade do rejeito em comparação às misturas convencionais. Foi proposta a faixa C do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) como faixa granulométrica adotada. Os resultados de caracterização ficaram dentro dos padrões aceitáveis, com exceção da adesividade, sendo necessário o uso de *doping*. Os resultados mecânicos (RT e MR), por exemplo, foram superiores aos das misturas usando brita convencional, sendo o rejeito de Farias Brito recomendado para emprego na pavimentação.

Miranda, Bacarji e Ferreira (2007) fizeram misturas de resíduos do beneficiamento de mármore e granito para tijolos maciços de solo-cimento. O objetivo do trabalho era verificar a viabilidade técnica do resíduo. As misturas foram feitas com teores de 0%, 10%, 15% e 30% de resíduo em massa e com teores de 5%, 10% e 15% de cimento. Todas as misturas se mostraram efetivas em relação aos testes realizados, tanto químicos como físicos, salvo a de 5% de cimento, por ser considerada pelos autores uma quantidade pequena. Não houve aumento na quantidade de cimento nas composições que tiveram acréscimo de resíduo, pois o acréscimo de cimento e resíduo foram em relação à massa de solo.

Ribeiro *et al.* (2007b) estudaram o uso de rejeitos de rochas ornamentais em misturas asfálticas. Os resíduos foram provenientes do corte de gnaiss produzidos por uma

pedreira de rochas ornamentais em Santo Antônio de Pádua, no Rio de Janeiro. A intenção era utilizar esse rejeito na composição de mistura asfáltica, em substituição aos agregados comumente utilizados, no caso o basalto. Esses autores realizaram caracterização do resíduo como: ensaio de abrasão, índice de forma, ensaio de adesividade e avaliação mecânica da mistura asfáltica composta pelos resíduos. Os resultados indicaram a potencialidade do uso do rejeito, com valores de 26% de abrasão e 150 MPa para compressão uniaxial.

Dantas (2008) trabalhou com os rejeitos de granito na produção de cerâmica branca, grés porcelanato. O rejeito, oriundo de Bom Jardim – PE, era disposto em lagoas de decantação em forma de lama. O estudo se propôs a analisar as influências sobre as propriedades físicas e mecânicas do acréscimo do rejeito na cerâmica branca. O trabalho misturou argila da cidade de Arês – RN, feldspato de uma mineradora, situada na cidade de Parelhas - PB, com o resíduo de granito até um teor de 40% em massa. Segundo o autor, as propriedades tecnológicas (retração linear, absorção de água, porosidade, resistência à flexão, etc.) estão dentro dos limites aceitáveis das normas.

Queiroz e Frascá (2008) fizeram um estudo para o aproveitamento de resíduos pétreos de marmorarias, como agregados para concreto de cimento Portland. Os materiais foram submetidos a uma seleção litográfica, sendo depois cominuídos em um britador e caracterizados por diversos testes, como granulometria e abrasão. Posteriormente foram submetidos aos ensaios de RCS e RT com tempos de cura de 7, 14 e 28 dias e independente das características das simulações, as resistências deram em torno de 35 MPa, valor apropriado para uso em concretos.

Menezes *et al.* (2008) utilizaram resíduo de caulim para a confecção de argamassas para alvenaria. Eles verificaram a viabilidade técnica e a atividade pozolâmica do caulim, em condição natural e após queima, em argamassas de cimento, cal e areia. Segundo Luz *et al.* (2005), caulim é uma rocha de granulometria fina, constituída de material argiloso, normalmente com baixo teor de ferro, de cor branca ou quase branca, usado na indústria do papel, cerâmica e tintas. O resíduo utilizado na pesquisa foi proveniente da indústria de beneficiamento de caulim de Juazeirinho – PB. No trabalho, houve substituição parcial do cimento por 5%, 10%, 15% e até 20% de resíduo em massa. Os autores obtiveram resultados satisfatórios nos ensaios de RCS, com destaque para o caulim calcinado que obteve resultados com incremento de até 150% na resistência à compressão simples após 28 dias de cura.

Araújo (2008) investigou o aproveitamento de resíduos da extração de micaxisto em pavimentos flexíveis. O resíduo foi oriundo do processamento da rocha do tipo micaxisto (pó de micaxisto) proveniente da pedreira do Departamento de Estradas de Rodagem do

município de Goiânia. O trabalho visou incorporar o resíduo em camadas de base ou sub-base e avaliar seu comportamento mecânico. As amostras foram de: 20%, 30% e 100% de pó de micaxisto mais solo (areia argilo-siltosa); 100% de solo; 100% cascalho e 30% brita 1 mais 70% de solo. O pó de micaxisto foi enquadrado como uma areia pedregulhosa que adicionada ao solo diminuía sua plasticidade. O pó de micaxisto puro não pôde ser avaliado, devido sua difícil trabalhabilidade (não foi possível compactar) e foi indicado como sem suporte, não podendo ser utilizado sozinho em obras de pavimentação. As misturas se mostraram aptas a serem usadas em camadas de sub-base. O cascalho puro obteve os melhores resultados mecânicos.

Alves (2008) fez estudo sobre características e viabilidade do uso de resíduos gerados do polimento de rochas graníticas como aditivo em concretos. O resíduo foi proveniente de uma pedreira em Pampulha, Belo Horizonte/MG. A adição do resíduo se deu na taxa de 10% a 20%. Os concretos com adição de resíduo de granito apresentaram diminuição da porosidade e permeabilidade, proporcionando melhorias em seu estado endurecido em relação aos concretos de referência devido ao efeito filler proporcionado pelo resíduo.

Martin, Ribeiro e Correia (2008) utilizaram rejeitos de corte de granito como agregado mineral para misturas asfáltica. O material foi oriundo de Cachoeiro de Itapemirim/ES e comparado com um agregado basáltico de São Carlos/SP. O objetivo do trabalho foi verificar a utilização do rejeito em misturas asfálticas, comparando o comportamento com agregado basáltico. O agregado foi caracterizado com resultados dentro dos padrões aceitáveis de norma, como por exemplo, uma abrasão inferior a 30%. As misturas foram ensaiadas e os resultados ficaram dentro das exigências normativas, sendo recomendadas na área de pavimentação.

Rocha *et al.* (2008) verificaram o comportamento mecânico de argamassas mistas para alvenaria utilizando resíduo de caulim. O objetivo do estudo era substituir parcialmente a cal hidratada por resíduo. Eles realizaram ensaios de caracterização química, granulometria, resistência à compressão e tração direta. A substituição de cal por adições de até 20% de resíduo de caulim possibilitou o aumento da RCS de argamassas estudadas em até 80%. Os autores foram capazes de concluir que o resíduo pode ser usado na produção de argamassas para a construção civil com propriedades mecânicas dentro dos parâmetros normativos e concluíram que a adição do resíduo pode aumentar a resistência mecânica das argamassas convencionais.

Lucena (2009) estudou a utilização do resíduo de caulim e de serragem do granito como fíler em misturas asfálticas sob o efeito da presença de água. Os resultados mecânicos apresentaram valores superiores ao mínimo exigido pelo DNIT, com tendência crescente ao incremento do fíler. O resíduo do caulim apresentou os melhores resultados mecânicos, no entanto, o resíduo do granito apresentou menor susceptibilidade à água. Segundo a autora, desde que seja observada a compatibilidade de deformação entre camadas, os resíduos de granito e de caulim podem ser utilizados como fíler em concretos asfálticos.

Babisk (2009) estudou o desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de rochas ornamentais. Vidros sodo-cálcicos são os tipos de vidro mais comuns, e mais utilizados, hoje em dia, na composição de garrafas, frascos, janelas e etc. Os resíduos eram de origem de duas empresas de Cachoeiro de Itapemirim/ES, uma de granito (silicático) e outra de mármore (carbonático). Nesse trabalho foram desenvolvidos quatro tipos de vidros sodo-cálcicos com suas composições ajustadas por outros materiais. Esses vidros foram testados e suas medidas comparadas às de vidros comerciais. De acordo com a autora, os resíduos podem ser utilizados satisfatoriamente como aditivos na fabricação de vidros, podendo ser empregados em janelas e em embalagens de bebida.

Conceição *et al.* (2009) verificaram, de forma preliminar, a possibilidade do uso do rejeito da pedra sabão para misturas asfálticas. Os rejeitos foram oriundos de uma pedreira em mata dos Palmitos, Ouro Preto, MG. A pedra sabão é um tipo de rocha metamórfica, branda, baixa dureza, compacta, plástica, untuosa ao tato. O estudo preliminar realizou testes que investigaram a potencialidade de adsorção entre o ligante asfáltico e o resíduo da pedra sabão. Segundo os autores, existe a potencialidade do resíduo ser usado na pavimentação, mas faz-se necessário a realização de ensaios mecânicos para conclusões mais concretas.

Paldés (2009) investigou o aproveitamento de rejeitos de rocha na arquitetura, assim como em vias públicas. O trabalho se propôs em mostrar alternativas possíveis, economicamente e ecologicamente aos rejeitos oriundos do beneficiamento de rochas ornamentais. Das possibilidades, citou a utilização de filetes resultantes de corte de placas para o uso em painéis decorativos e cacos de mármore que podem ser aplicados de forma paginada e ordenada para formar um piso.

Silva, Oliveira e Souza (2009) aplicaram resíduo industrial de rochas ornamentais na indústria da cerâmica. Nesse trabalho foram determinados e analisados parâmetros físicos e mecânicos dos corpos de prova produzidos a partir de massas compostas de Pó Fino de Polimento (PFP) e argila (10% PFP/90% argila e 40% PFP/60% argila), visando à fabricação de produtos de cerâmica vermelha. A finura do rejeito foi determinante para a economia de

energia de cominuição (fragmentação). A adição de 40% de PFP à argila proporcionou valores de plasticidade favorecendo a extrusão das peças e absorção d'água abaixo de 20%, valor limite requerido para as telhas.

Souza, Ribeiro e Carrisso (2009) viabilizaram um estudo sobre a aplicação do resíduo oriundo do corte de mármore na matriz do polipropileno. O polipropileno é um dos plásticos de menores custos no mercado, além de ter boas características para fazer parte de um compósito, como fácil usinagem, regular resistência ao atrito, etc. Constatou-se que houve uma distribuição homogênea das partículas de mármore, ocorreu um aumento na resistência ao impacto proporcional ao teor de resíduo, os compósitos são hidrofóbicos e a degradação dos mesmos ocorreu a 450°C. Certificou-se que o material com 60% de resíduo possui a maior capacidade de armazenar energia sob variação térmica e a temperatura de fusão dos compósitos aumentou de acordo com o teor de resíduo. Segundo os autores, o resíduo de mármore fornece tanto estabilidade térmica quanto mecânica ao compósito.

Misra *et al.* (2010) analisaram o uso da lama de mármore, resultado do corte das placas da rocha. O solo foi coletado do distrito de *Rajsamand, Rajasthan, Índia* e o resíduo da *Moonlight Marbles*. Os autores indicaram por meio de testes que, além de material de preenchimento de aterros, 20% a 30% do solo pode ser substituído por lama de mármore na preparação de subleito em pavimentos. Eles fizeram testes de LL, LP, CBR, etc. As misturas de solo + resíduo tiveram valor médio de CBR de 17%. As misturas com resíduo tiveram também redução no limite de liquidez e um leve aumento no índice de plasticidade, uma vez que o material do resíduo é fino.

Conceição *et al.* (2010) estenderam o estudo de corte de pedra sabão para ensaios mecânicos e ensaios acústicos adicionando resíduos de corte de granito. Para isso realizaram misturas asfálticas com o intuito de substituir os agregados convencionais. As misturas continham esses resíduos separados ou em conjunto. Os resultados indicaram que os pavimentos formados apenas com resíduos de granito ou quando misturados com resíduos de pedra sabão apresentaram valores de resistência à tração de 1,04 MPa e 1,69 MPa, respectivamente, adequados para pavimentação. Os níveis de ruídos desses pavimentos foram 28 dB e 12 dB, respectivamente, indicando que a presença da pedra sabão foi capaz de reduzir os níveis de ruído do pavimento.

Souza, Pinheiro e Holanda (2011) estudaram o efeito da adição de resíduo de rocha ornamental nas propriedades tecnológicas e microestrutura de piso cerâmico vitrificado. Prepararam uma série de massas cerâmicas contendo até 30% em peso de resíduo de rocha ornamental. As seguintes propriedades tecnológicas foram determinadas: absorção de água,

massa específica aparente, entre outros. Os resultados mostraram que adições de até 30% em peso de resíduo de rocha ornamental causaram variações significativas na generalidade das propriedades tecnológicas da massa cerâmica de referência. A microestrutura das peças cerâmicas também foi influenciada com a incorporação do resíduo estudado. Os resultados também mostraram que a substituição de feldspato sódico por resíduo de rocha ornamental nas massas cerâmicas tendeu a melhorar a qualidade do piso cerâmico.

Marçal (2011) pesquisou o uso de resíduos da indústria de rochas ornamentais na fabricação de vidros especiais. Segundo o autor, tais resíduos possuem elevado potencial para utilização na fabricação de vidros. Os resultados obtidos permitiram ao autor concluir que é possível produzir vidro borossilicato a partir de resíduos de rochas ornamentais submetidas a um ajuste de composição que incluiu adições de óxido de boro (B_2O_3) e areia (fonte de sílica). Dentre os resíduos utilizados, verificou-se que o resíduo de granito é o mais indicado.

Pinto (2011) realizou um trabalho utilizando o rejeito da Pedra Cariri (calcário laminado) como material para camadas granulares de pavimento flexível. Essa autora mesclou um solo fino da zona rural de Barbalha com o rejeito de Pedra Cariri e realizou a caracterização do solo e do rejeito, fez misturas com três teores: 30%, 50% e 70% em massa. O melhor CBR obtido foi de 60 % para o teor de 50 % de mistura solo/resíduo.

Rodrigues *et al.* (2011) estudaram resíduos de rochas ornamentais para a produção de materiais vítreos. Foram utilizados resíduos de corte de mármore e granito, na forma de pó, de uma pedreira do Espírito Santo. O objetivo foi reaproveitar esse resíduo na forma de matéria prima parcial de materiais vítreos, como a lã mineral. A lã mineral é um nome geral dado para muitos materiais inorgânicos de isolamento feito de fibras. O resíduo foi caracterizado, sendo realizada a análise química. Os resultados obtidos na pesquisa indicaram que os resíduos podem ser empregados na produção da lã.

Tapahuasco *et al.* (2012) usaram resíduos oriundos do corte de rochas graníticas como agregado mineral em misturas de concreto asfáltico. Os resíduos estudados eram provenientes de uma pedreira em Colatina/ES, sendo britados e organizados em granulometrias apropriadas. A fim de respeitar as exigências normativas, os resíduos foram submetidos aos ensaios de índice de forma, abrasão, absorção, etc. Com o propósito de avaliar o efeito da adição dos resíduos nas misturas, realizaram-se ensaios de estabilidade Marshall. Segundo os autores, pelos resultados obtidos foi verificada a potencialidade do uso de resíduos de corte de rochas graníticas. Alguns resultados: absorção < 1%, excelente adesividade, forma cúbica das partículas, abrasão de 37%, estabilidade e fluência melhores até que de agregados convencionais.

Suassuna, Brasileiro e Prado (2012) fizeram o reaproveitamento do rejeito da extração e beneficiamento da Pedra Cariri em massas cerâmicas. No trabalho, eles tiveram o propósito de avaliar a potencialidade de uso como matéria-prima na indústria de placas cerâmicas e realizaram caracterização química, física e mineralógica. Os resultados preliminares indicaram que, como fontes de calcita pura, os rejeitos podem ser usados em matéria-prima de placas cerâmicas monoporosas, bem como em aplicações agrícolas, como corretivo de acidez de solo.

Raymundo *et al.* (2012) pesquisaram sobre o uso de resíduos de serragem de mármore como corretivo de acidez de solo. O objetivo do estudo foi realizar a comparação em relação à capacidade de neutralização do solo, entre um resíduo de mármore serrado em tear adiamantado, outro serrado em ter convencional e um calcário comercial. Os resíduos apresentaram bom potencial para a utilização como corretivo de acidez do solo.

Moura, Leite e Bastos (2013) pesquisaram sobre o resíduo decorrente da serragem da Pedra Cariri, denominado de RSPC (Resíduo de Serragem da Pedra Cariri). O trabalho verificou a viabilidade técnica da incorporação do RSPC em concretos convencionais como substituinte parcial do cimento. De acordo com os resultados, os valores de RCS ficaram inferiores aos permitidos por norma, inviabilizando a técnica de substituição parcial do RSPC pelo cimento.

Degen *et al.* (2013) estudaram sobre concretos produzidos com resíduos provenientes de beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial de cimento. Os resíduos foram originados do corte e serragem de chapas de mármore e granito, de pedreiras do Espírito Santo e utilizaram-se os teores de 5%, 10% e 15% de resíduo. Os autores determinaram não realizar nenhum tipo de pré-tratamento com o resíduo e adicioná-lo às misturas tal qual se obtinha da fonte. Os autores comprovaram que a incorporação dos resíduos não afetou o desempenho dos concretos produzidos. O melhor resultado de resistência à compressão simples foi para o teor de 5% de resíduo, com a relação de água/cimento de 0,45.

Gandhi (2013) investigou a estabilização de solo expansivo da região de *Surat*, Índia, usando cinza da casca de arroz e pó de mármore. O autor misturou o solo nas proporções de 10%, 20%, 30% com os resíduos separadamente. O resíduo do pó de mármore e a cinza da casca do arroz são encontrados na região, e foram escolhidos por sua acessibilidade e preço. Ele realizou testes de limite de liquidez, limite de plasticidade, expansão, contração e CBR. O autor concluiu que ambos os resíduos são úteis na

estabilização de solo expansivo, além disso, a mistura de solo + pó de mármore foi mais bem sucedida nos testes, diminuindo em 80% a expansão do solo, por exemplo.

Luz *et al.* (2013) realizaram beneficiamento de sienito de Tanguá-RJ para produção de fertilizante alternativo de potássio. Sienito é uma rocha isenta de quartzo e formado, basicamente, por feldspatos alcalinos e por isso apresenta potencial para fertilizante alternativo de potássio, pois é rico em K_2O . O produto obtido com a calcinação do sienito na granulometria abaixo de $147\ \mu m$ (100 mesh), usando o cloreto de cálcio como fundente, tem potencial para ser usado como fertilizante de liberação lenta de potássio, principalmente para culturas de médio e longo ciclo.

Arruda (2014) aplicou resíduos de rochas ornamentais como carga para fabricação de compósitos de matriz polimérica. As cargas desempenham um importante papel nos materiais compósitos e nano compósitos, uma vez que as propriedades desses materiais dependem da sua morfologia e da dispersão na matriz polimérica (PEIXOTO, 2012). O resíduo de mármore Bege Bahia foi aplicado como carga em materiais poliméricos e realizou-se a incorporação de diferentes porcentagens dessa carga mineral numa matriz polimérica de polipropileno. Segundo a autora, o resíduo pode ser usado como carga mineral até 50% em massa, reduzindo o custo do material, e aproveitando o máximo possível no compósito, mitigando assim o impacto ambiental.

Rodrigues *et al.* (2014) conduziram pesquisa sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização do resíduo industrial de ardósia em mistura asfáltica do tipo Pré-Misturado a Frio (PMF). A ardósia é um tipo de rocha ornamental de cor normalmente verde escuro, sendo seus resíduos lamelares e pouco porosos. Os resultados da pesquisa foram favoráveis ao uso do resíduo da ardósia como agregado alternativo em PMF, com comportamento mecânico similares aos agregados convencionais.

Mishra, Yadav e Singhai (2014) estudaram o efeito de pó de granito nos índices do solo de algodão negro (*black cotton soil*) estabilizado com cal. O solo de algodão negro é um solo típico da região oriundo da decomposição de lava negra e é um solo rico em montmorilonita, o que lhe rende muita expansividade. Os autores realizaram misturas solo/cal variando o teor de pó de granito entre 10%, 20% e 30% e fixando-se o teor de cal em 5%. Dos resultados, observou-se que há um decréscimo significativo no comportamento expansivo do solo quando se acrescenta o resíduo pó de granito. Tem-se, por exemplo, o limite de liquidez caindo de 57% (solo puro) para 28% (solo +5% de cal+30% de pó de granito).

Cosme e Lutif (2014) fizeram estudo reológico de mástiques com fíler de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e escória de aciaria. O resíduo do beneficiamento de

rochas foi proveniente da empresa de desdobramento de blocos de rocha, Granriva Granitos, localizada na cidade de Colatina/ES e a escória de aciaria moída, posteriormente moída em laboratório fornecida pela Arcelor Mittal, localizada em Jardim Limoeiro, Serra. O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) utilizado foi o 50-70 e foram testadas três relações f/b (fíler/betume) de adição de resíduo em relação à massa de ligante (0,36; 0,54 e 0,72). Foram realizados ensaios oscilatórios, de recuperação de fluência e de fadiga. Segundo os autores, pelos resultados preliminares, o acréscimo dos resíduos torna o ligante menos suscetível à deformação permanente e à fadiga.

Khandve e Rathi (2015) estudaram o resíduo da indústria de mármore na construção de blocos de concreto para pavimentação. O rejeito usado na pesquisa foi proveniente de uma indústria na cidade de Amravati do estado de Maharashtra, Índia. Os autores realizaram testes de absorção, resistência à compressão, dentre outros. As misturas com resíduo se fizeram nos teores de 0%, 17%, 34%, 51%, 68%, 85% e 100%, mantendo-se a relação água/cimento em 0,6. Os resultados mostraram que a substituição dos agregados usuais em até 70% de resíduo da indústria do mármore é possível com ótimos resultados.

Sousa (2016) analisou as propriedades mecânicas do resíduo de britagem de rocha calcária para verificar a possibilidade de ser utilizado como material de preenchimento de aterro. O material estudado foi obtido da pedreira Coelho Brita, próximo a Mossoró, RN. Foram realizados ensaios de granulometria, compactação, cisalhamento direto, compressão edométrica (ensaio de adensamento lateralmente confinado), etc. Os resultados demonstraram que o material apresentou alta resistência e baixa compressibilidade, no entanto, apresentou baixo coeficiente de permeabilidade, o que deve ser avaliado em um projeto.

Após a revisão bibliográfica realizada, observou-se que os resíduos provenientes de rochas e rochas ornamentais tem diversas aplicações nas áreas de construção civil, agronomia, pavimentação e que pesquisas são importantes para ajudar a resolver o problema da sua disposição inadequada na natureza. Entretanto, observa-se que há uma grande necessidade de que os estudos possam sair do laboratório e cada vez mais serem aplicados no campo.

2.10 Considerações Finais

Na construção deste capítulo, buscou-se fazer um levantamento de informações sobre reuso de resíduos nas áreas da construção civil, pavimentação entre outras, informando a variedade de resíduos que são utilizados e conhecendo-se o procedimento experimental geral adotado por cada trabalho. O próximo capítulo traz uma descrição detalhada do processo

de escolha dos materiais empregados no presente trabalho, assim como a metodologia que foi seguida para o alcance dos objetivos desta pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Escolha dos materiais

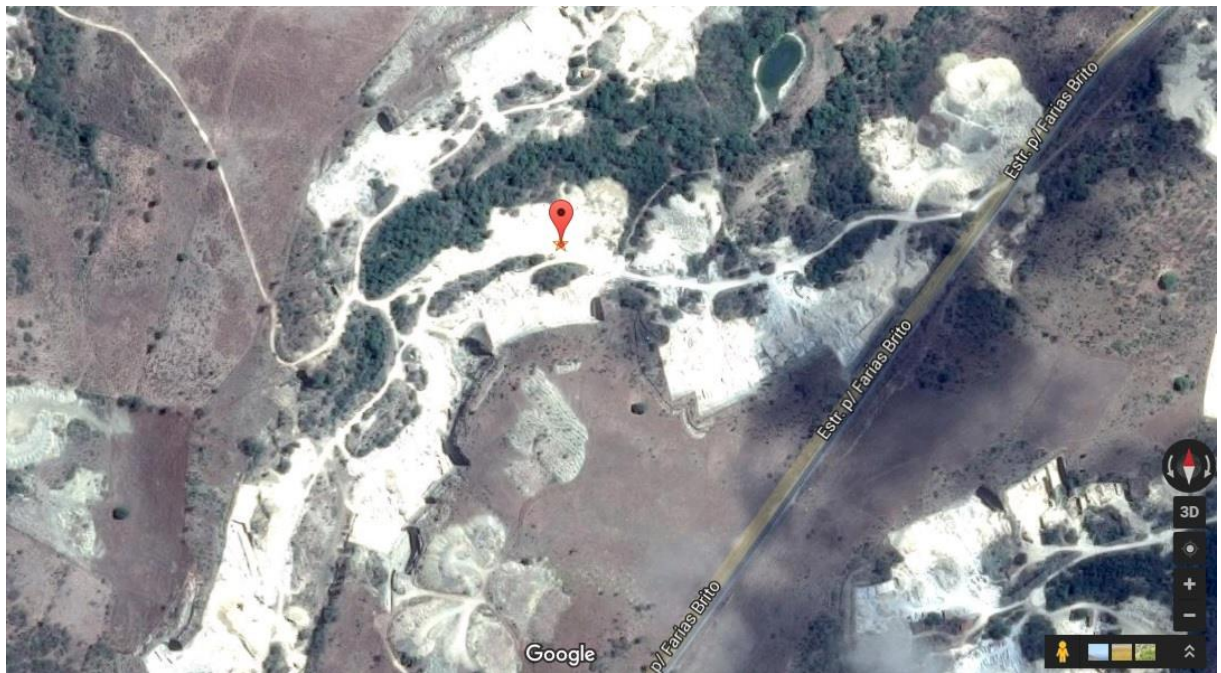
3.1.1 *Resíduo da Pedra Cariri (RPC)*

Primeiramente foi aplicado um questionário (ver apêndice) a algumas empresas da RMC, como: Estylosa, New Way e outras, sobre os tipos de resíduos produzidos com o propósito de obter informações tais como: destinação, comercialização, reutilização, etapas de produção, etc.

O Resíduo da Pedra Cariri (RPC) foi cedido pelo Comércio de Pedras Alencar, localizado na cidade de Nova Olinda. O local de coleta fica às margens da CE-160, entre os municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri, em pedreiras localizadas no sítio Massapê. As coordenadas do ponto de coleta são: 7°07'19.1"S 39°41'58.2"W, conforme podem ser observadas na Figura 14 e Figura 15. As amostras foram coletadas de uma pilha escolhida arbitrariamente, para uma simulação mais próxima da realidade do local em que o RCP se encontra depositado. A pilha de onde foram retiradas as amostras é ilustrada pela Figura 16.

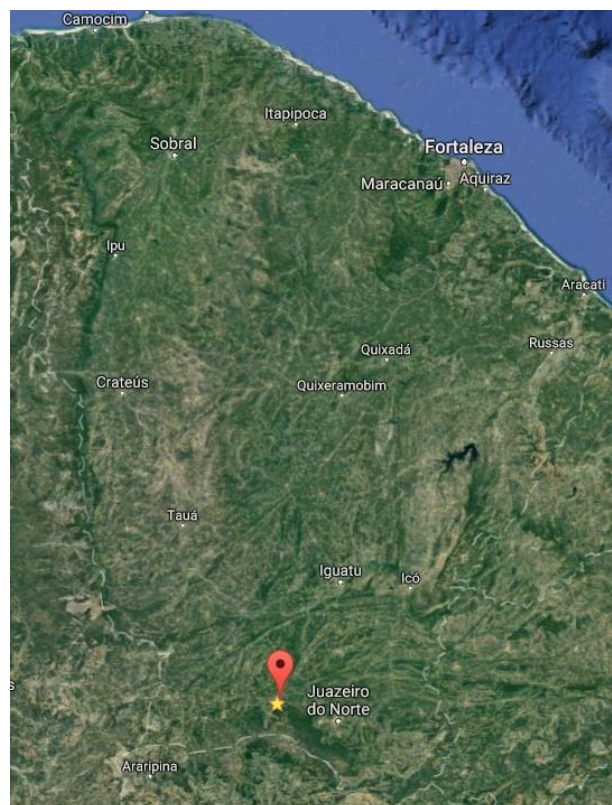
Manufaturou-se uma tela de dimensões 1m × 1m, com abertura de 63,5 mm para separar o material na coleta, e limitar o tamanho máximo de agregado. O tamanho máximo de 63,5 mm do resíduo foi estabelecido pela norma ABNT (2004) NBR 15115 de Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Execução de Camadas de Pavimentos – Procedimentos.

Figura 14 - Localização da coleta de resíduos da Pedra Cariri.



Fonte: Adaptado de Google Maps.

Figura 15 - Localização da coleta de resíduos da Pedra Cariri em relação ao Estado.



Fonte: Adaptado de Google Maps.

Figura 16 - Pilha de resíduos da Pedra Cariri na cidade de Nova Olinda da amostra coletada.



Fonte: Próprio autor.

3.1.2 Solos

Na etapa inicial desta pesquisa foram empregadas duas amostras de solos: uma arenosa e outra argilosa. O solo argiloso é proveniente do município de Nova Olinda (ver Figura 17), enquanto o solo arenoso é oriundo do município do Crato (ver Figura 18). Esses dois solos foram nomeados nos textos com as iniciais Cr (Crato) e Nova Olinda (NO).

Figura 17 - Detalhes do solo de Nova Olinda coletado.



Fonte: Próprio autor.

Figura 18 - Detalhes do solo do Crato coletado.



Fonte: Próprio autor.

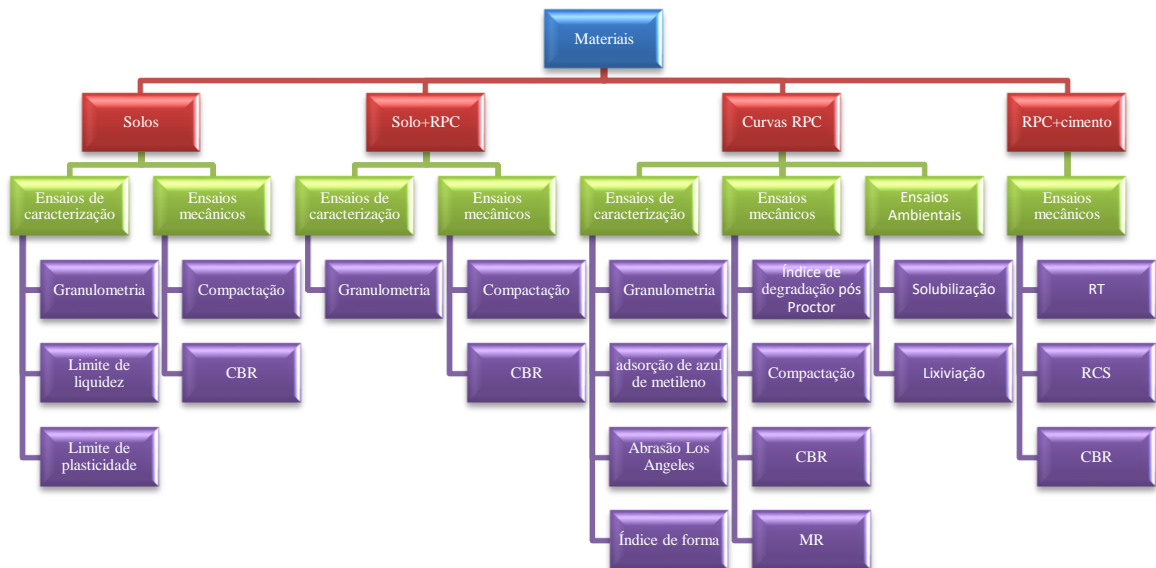
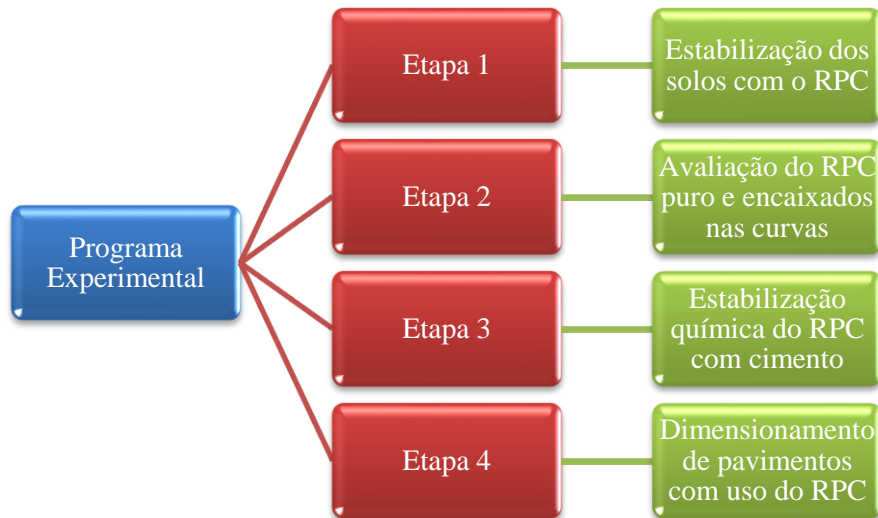
3.1.3. Cimento

O cimento utilizado no estudo foi o do tipo comercial, CP-II, por sua disponibilidade no mercado, e por não haver nenhuma restrição no Manual de Pavimentação do DNIT (2006), esse material possui de 6 a 14% de pozolana e até 10% de material carbonático. O teor ótimo utilizado para estabilizar o RPC foi de 5,5% em massa dosado de acordo com a norma DNER ME 202/94. Esse teor foi escolhido pelo fato da mistura (RPC + cimento) ter atingido 2,1 MPa de Resistência à Compressão Simples (RCS) para uma cura de 7 dias. No capítulo 5, serão mostrados maiores detalhes para a escolha do teor de 5,5% de cimento.

3.2 Definição das Etapas da Pesquisa Experimental

Sobre a definição das etapas da pesquisa apresenta-se fluxograma dividindo as etapas e mostrando o desdobramento do programa experimental.

Fluxograma



3.2.1. Primeira Etapa - Estabilização Granulométrica dos Solos com o RPC

A proposta inicial do trabalho foi avaliar a estabilização granulométrica por meio de misturas de solos com a Pedra Cariri. Para tanto, o RPC foi adicionado a dois solos (um arenoso e um argiloso) nos teores de 40%, 50% e 60% de resíduo, em massa.

Os solos naturais e os compostos com o RPC foram submetidos aos ensaios de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação, CBR e expansão. Para facilitar a identificação das diversas amostras, foram criadas nomenclaturas para as misturas dos dois solos distintos com os três diferentes teores de RPC, conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6 - Nomenclatura das misturas usadas para a estabilização granulométrica.

Nomenclatura	Descrição
Cr0%	100 % de Solo arenoso do Crato com 0% de RPC
Cr60RPC40	60% de Solo arenoso do Crato com 40% de RPC
Cr50RPC50	50% de Solo arenoso do Crato com 50% de RPC
Cr40RPC60	40% de Solo arenoso do Crato com 60% de RPC
NO0%	100% de Solo argiloso de Nova Olinda com 0% de RPC
NO60RPC40	60% de Solo argiloso de Nova Olinda com 40% de RPC
NO50RPC50	50% de Solo argiloso de Nova Olinda com 50% de RPC
NO40RPC60	40% de Solo argiloso de Nova Olinda com 60% de RPC
RPC100%	100% de RPC

Fonte: Próprio autor.

3.2.2. Segunda Etapa - Avaliação do RPC Puro e Encaixados nas Curvas A, B, C e D do DNIT

Na segunda etapa, foi realizada a avaliação do RPC puro e encaixados nas faixas granulométricas A, B, C e D do DNIT, de modo que foram selecionadas as duas curvas do RPC que apresentaram as melhores propriedades mecânicas à luz do CBR e MR. As curvas propostas pelo DNIT são constituídas de faixas granulométricas contínuas como exigência normativa para a construção da camada de base de pavimentos, como observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Faixas A, B, C, D, E e F do DNIT para bases de pavimentos.

Peneiras	I				II	
	A	B	C	D	E	F
	% em peso passando					
2"	100	100	–	–	–	–
1"		75-90	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100		–
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25

Fonte: Adaptado de Manual de Pavimentação (DNIT, 2006).

Para analisar o comportamento do RPC puro e encaixado nas faixas granulométricas médias A, B, C e D do DNIT foram preparadas em laboratório diferentes granulometrias que foram nomeadas de RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D e RPC puro. Ressalte-se que a faixa mais utilizada na Região Metropolitana do Cariri é a faixa C, sendo as faixas A e D, aquelas que apresentam maior quantidade de fração grossa e fina, respectivamente.

Os ensaios realizados para o RCP puro e/ou RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D foram: análise granulométrica, adsorção de azul de metileno, abrasão, absorção, índice de forma, índice de degradação pós compactação Proctor (IDp), compactação, California Bearing Ratio (CBR) e Módulo de Resiliência (MR).

3.2.3. Terceira Etapa - Estabilização Química do RPC com Cimento

Na terceira etapa, resolveu-se investigar se a adição de estabilizantes químicos seria capaz de promover melhorias no comportamento mecânico do RCP. Para as curvas com melhores resultados mecânicos de CBR e MR, determinados na segunda etapa, optou-se por fazer o acréscimo de um teor ótimo de cimento. Não foi realizada a estabilização com cal, pois o material tratado neste trabalho é rico em calcita. A calcita é a matéria-prima para fabricação da cal. Do ponto de vista químico, não se espera nenhum tipo de reação pozolânica que venha conferir algum tipo de incremento de resistência na mistura de calcário laminado e cal.

A dosagem das duas melhores misturas (RPC puro e RPC-B, como será visto no próximo capítulo) foi realizada, conforme a norma DNER ME 202/94, para os teores de 2%, 5% e 7% de cimento. Após cura de 7 dias, os corpos-de-prova foram imersos em água durante 4 horas, sendo encontrado o teor ótimo de cimento (5,5%, como também será visto no capítulo de resultados) para que a mistura atingisse uma RCS mínima de 2,1 MPa. Em seguida, para as duas misturas (RPC puro e RPC-B) moldadas no teor ótimo de cimento foram realizados os seguintes ensaios: RCS, Resistência à Tração (RT) e CBR para os tempos de cura de 1, 7 e 28 dias.

3.2.4. Quarta Etapa - Dimensionamento de Pavimentos com o Uso do RPC e Análise Técnica e de Custos

Na quarta etapa, realizou-se o dimensionamento empírico e mecanístico-empírico de pavimentos com RPC, bem como foi realizada a análise técnica e de custos. Para o dimensionamento pelo método empírico foi utilizado o Método de Dimensionamento do DNIT com os dados de CBR, enquanto para o método mecanístico-empírico foi utilizado o programa SISPAV 2009 com os dados de MR.

3.3 Ensaios Realizados

3.3.1 Análise Granulométrica e Índices Físicos

Na preparação dos solos utilizou-se a norma DNER ME 041 e para a análise granulométrica empregou-se a norma DNER ME 080. Para a determinação dos índices físicos dos solos foram usadas as normas para limite de liquidez DNER ME 122 e limite de plasticidade DNER ME 082.

A norma utilizada para fazer a análise granulométrica do resíduo foi a DNER-ME080-94. Segundo a NBR 15115/2004, a curva granulométrica recomendada é a contínua. Outro item recomendado por norma é a determinação do Coeficiente de Uniformidade (C_u) do agregado reciclado que deve ter um valor igual ou maior que 10.

Pela inexistência de norma para o RPC, para este estudo o valor de dimensão máxima característica, de 63,5 mm, foi tomado como referência pela norma NBR 15115/2004. Um pequeno resumo das características exigidas pela norma ABNT NBR 15115 pode ser encontrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Algumas características do agregado reciclado de resíduos sólidos da construção recomendados pela ABNT NBR 15115.

Características	Recomendação NBR 15115
Dimensão Máxima Característica (mm)	63,5
Passante na peneira 0,42 mm (%)	Entre 10 e 40
Coeficiente de uniformidade	≥ 10
CBR (%)	≥ 60 (p/base) e ≥ 20 (p/ sub-base)
Expansão (%)	$\leq 0,5$ (p/base) e ≤ 1 (p/ sub-base)

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15115.

3.3.2 Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno

A atividade da parte fina do resíduo foi analisada por meio do ensaio de adsorção de azul de metileno conforme método proposto por Fabbri (1994). Para o cálculo do ensaio de azul de metileno usou-se a Expressão (1).

$$Va = V \times \frac{P_{200}}{100} \times \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad (1)$$

Onde:

Va = valor de azul de metileno;

V = volume de azul;

P₂₀₀ = Porcentagem passante na peneira nº 200

W = umidade da amostra.

3.3.3 Ensaio de Absorção

A absorção de um material está diretamente ligada a sua porosidade e tem como forma padrão de determinação a sua imersão por 24 horas em água a temperatura ambiente. A especificação DNER-ME 081/98 (Determinação da Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Agregados Graúdos) foi a utilizada para este trabalho.

3.3.4 Fluorescência de Raios-X

A fluorescência de raios-X foi realizada nesta pesquisa para a determinação da composição química e da proporção dos óxidos no RPC. Este ensaio foi realizado pelo equipamento Rigaku (ZSX Mini II) pelo Laboratório de Raios X, do Departamento de Física da UFC, campus Pici. Os resultados desse ensaio foram colocados no capítulo 2, na seção 2.6.1.1, pois trata diretamente da caracterização técnica do RPC.

3.3.5 Abrasão Los Angeles

Sabe-se que a ação do tráfego e a compactação na execução do pavimento podem causar desgaste aos agregados. Por esse motivo é necessário que se estipulem valores limites

para tal desgaste por abrasão. Os valores utilizados foram especificados pela norma DNER-ME 035/98 – Determinação da Abrasão Los Angeles.

3.3.6 Índice de Forma do Agregado

O índice de forma permite avaliar a qualidade de um agregado graúdo em relação à forma dos grãos e a norma que o determina é a DNER-ME 086/94 – Determinação do Índice de Forma. As dimensões dos agregados podem caracterizá-los como alongados, esféricos, cúbicos ou lamelares. Para o uso na pavimentação rodoviária os agregados devem possuir, preferencialmente, forma cúbica, pois essa forma permite um fracionamento menor durante a compactação e vida útil.

3.3.7 Índice de Degradação após Compactação Proctor (IDp)

Durante o processo de manuseio e execução de revestimentos asfálticos, os agregados estão sujeitos a sofrerem quebras e abrasão. Os agregados devem resistir a essas ações. O ensaio IDp permite avaliar a tenacidade e resistência abrasiva de um agregado natural proveniente de britagem de rocha, obedecendo a uma faixa granulométrica padronizada, com peneiras predefinidas. A norma que o determina é DNER – ME 398/99 (Agregado – Índice de Degradação após Compactação Proctor).

3.3.8 Compactação

Com o ensaio de compactação são obtidas a umidade ótima e a massa específica seca máximas. Ensaio de compactação Proctor foram realizados inicialmente com os solos e as misturas propostas, para tal procedimento foi utilizada a norma DNER-ME - 162/94- Ensaio de Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas. Para o material puro e as curvas manufaturadas, foi utilizado o método preconizado na especificação DNIT ME 164/2013 - Ensaio de Compactação Utilizando Amostras Não Trabalhadas. A energia de compactação utilizada foi a intermediária que concede 26 golpes ao material investigado, e a compactação foi realizada em cinco camadas. Como a proposta do trabalho é a de utilizar o RPC em camadas granulares, a energia intermediária é a energia estabelecida por norma.

3.3.9 Índice de Suporte Califórnia

Nesse ensaio, a amostra é compactada semelhantemente ao método Proctor, inclusive na mesma umidade indicada pelo método. Uma vez compactada a amostra e cumprido o tempo de imersão, um pistão com seção de 3 pol² penetra a amostra a uma velocidade de 1,27 mm/min, essa penetração é medida como resistência. O valor da resistência é dado em porcentagem, visto que é análoga à resistência de uma brita padrão. Supostamente, um material com valor de 100% de valor de resistência equivale a uma brita de elevada qualidade cujo padrão de referência foi adotado. Esse ensaio foi realizado, na energia intermediária, conforme preconiza a norma DNER-ME 049/94 – Determinação do Índice Suporte Califórnia.

Esse mesmo ensaio foi realizado com estabilização química com cimento obedecendo a cura de 7, 14 e 28 dias, mais a duração de imersão do CBR (Ver Figura 19).

Figura 19 - CBRs em processo de cura do RPC puro+5,5% de cimento.



Fonte: próprio autor.

3.3.10 Resistência à Compressão Simples (RCS)

O ensaio de RCS baseou-se na norma DNER-ME 201/94 (Solo-Cimento Compressão Axial de Corpos-de-Prova Cilíndricos). Esse ensaio prevê o teor ótimo de cimento, sendo que a dosagem foi realizada nos teores de 2%, 5% e 7%. A energia adotada para o ensaio foi a intermediária. Amostras para o RCS podem ser vistos na Figura 20 e 21.

Figura 20 - Corpos de prova do RPC puro+5,5% de cimento em processo de cura.



Fonte: Próprio autor.

Figura 21 - Corpo de prova do RPC puro+5,5% de cimento submetido ao ensaio de RCS.



Fonte: próprio autor.

3.3.11 Resistência à Tração (RT)

Este ensaio é regulamentado pela norma DNIT 136/2010-ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. O ensaio foi executado para o RPC, mesmo sendo um ensaio destinado para misturas asfálticas, adotando-se a energia intermediária de compactação.

3.3.12 Módulo de Resiliência (MR)

Bernucci *et al.* (2007) afirmam que estudos sobre a resiliência datam da década dos anos 30. A resiliência, segundo definição clássica, é a energia armazenada no corpo que deformou elasticamente, e quando a tensão que originou a deformação é cessada, a energia é liberada.

Em 1986, a AASHTO substituiu o CBR pelo MR na expressão do dimensionamento, em revisão ao seu método de dimensionamento de pavimentos. Desde então o MR passou a ser mais investigado no meio científico. O equipamento para o ensaio de MR é o de carga repetida. O MR é dado em MPa e é o módulo elástico obtido em ensaio triaxial de carga repetida, cuja expressão é dada pela Equação (2).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_R} \quad (2)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência;

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = Tensão desvio aplicada no eixo axial;

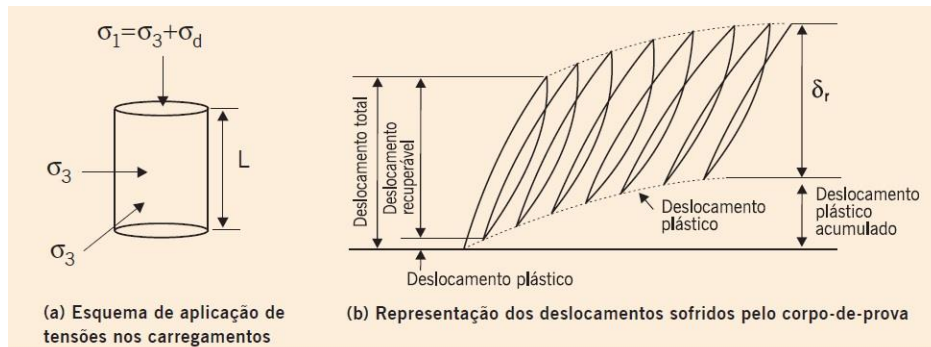
σ_1 = tensão principal maior;

σ_3 = tensão principal menor;

ϵ_R = deformação específica axial resiliente (recuperável).

O ensaio consiste na aplicação repetida da carga no corpo de prova onde são medidas as deformações. A aplicação da carga é semissenoidal. São aplicados diferentes tensões de confinamento σ_3 e tensões solicitantes σ_1 . A Figura 22 mostra como as tensões atuam no corpo de prova e o gráfico com os deslocamentos sofridos.

Figura 22 - Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga repetida.



Fonte: Bernucci *et al.* (2007).

Os resultados do ensaio são analisados por meio da utilização de modelos que melhor os representem. Regressões são realizadas com os resultados do ensaio, com a finalidade de correlacionar os valores encontrados com o melhor coeficiente de determinação (R^2). Os solos tendem a se comportar diferentemente em relação às tensões aplicadas a eles. Segundo Bernucci *et al.* (2007), os solos granulares sofrem mais influência da tensão de confinamento e os solos argilosos pela tensão desvio. As Equações (3), (4), (5) e (6) mostram alguns dos modelos mais comumente usados para a determinação do MR.

$$MR = k1 \times \sigma d^{k2} \quad (3)$$

$$MR = k1 \times \sigma_3^{k2} \quad (4)$$

$$MR = k1 \times \theta^{k2} \quad (5)$$

$$MR = k1 \times \sigma_3^{k2} \times \sigma d^{k3} \quad (6)$$

Outro modelo que, segundo Bastos (2013), ainda não é tão aplicado aos solos do estado do Ceará, é o modelo universal não linear, descrito pela Equação (7). Esse modelo pode ser aplicado a todos os outros materiais não tratados na pavimentação, variando de argilas plásticas até materiais granulares. O modelo universal é o modelo adotado no guia de dimensionamento da AASHTO (NCHRP 1-37A, 2004).

$$MR = k1 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{k2} \times \left[\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right]^{k3} \quad (7)$$

Onde:

Pa = pressão atmosférica;

k_1, k_2 e k_3 = parâmetros da regressão;

θ = primeiro invariante de tensões ($\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$), onde $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_d$;

τ_{oct} = tensão cisalhante octaédrica: $\tau_{oct} = \frac{1}{3} \times \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$.

A energia adotada para este ensaio foi a energia intermediária e o ensaio foi realizado de acordo com o método da COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia apresentado em MEDINA e MOTTA (2005). Destaque-se que esse método é muito semelhante ao da norma DNER-ME 131-94.

3.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram detalhados os materiais e métodos utilizados no presente trabalho. O próximo capítulo apresentará e analisará os resultados obtidos através do programa experimental aqui descrito.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados, discutidos e analisados, os resultados encontrados pelos ensaios realizados durante a presente pesquisa.

4.2 Resultados da Primeira Etapa - Estabilização Granulométrica dos Solos com o RPC

A proposta do trabalho, na primeira etapa da pesquisa, foi avaliar a utilização do Resíduo da Pedra Cariri para estabilização granulométrica de dois solos coletados na RMC. Realizaram-se misturas desses solos com o RPC nos teores de 40%, 50% e 60% em massa. Na Tabela 9 se encontra o resumo da caracterização dos solos investigados.

Tabela 9 - Resumo dos ensaios realizados nos solos locais da RMC

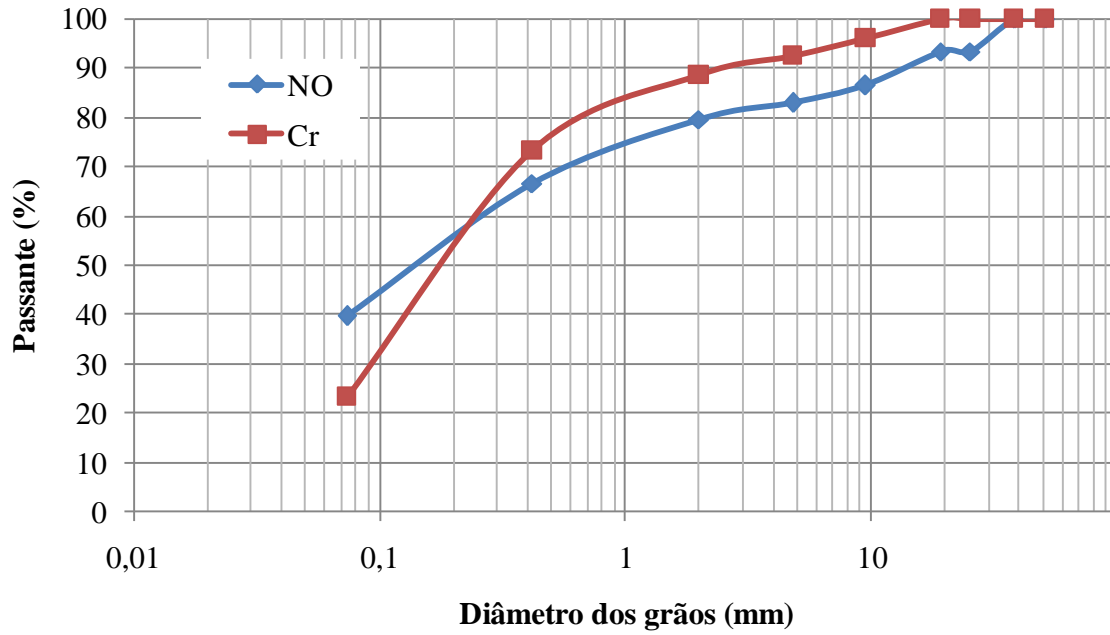
Solos	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IG	AASHTO	SUCS	Proctor		CBR (%)	EXP (%)
							Hot (%)	γ_{Smax} (g/cm ³)		
NO	29,1	18,1	11,0	1,18	A-6	SC	13,9	1,888	23,3	0,05
Cr	15,8	9,4	6,4	0,00	A-2-4	SM-SC	8,6	2,058	39,7	0,01

Fonte: Próprio autor.

Conforme os resultados da Tabela 9 observou-se que os solos NO e Cr possuem capacidade de suporte para serem usados como sub-base de pavimentos, não expandem significativamente, mas possuem IP fora do estabelecido em norma que é de no máximo 6%. A Figura 23 mostra a granulometria dos solos.

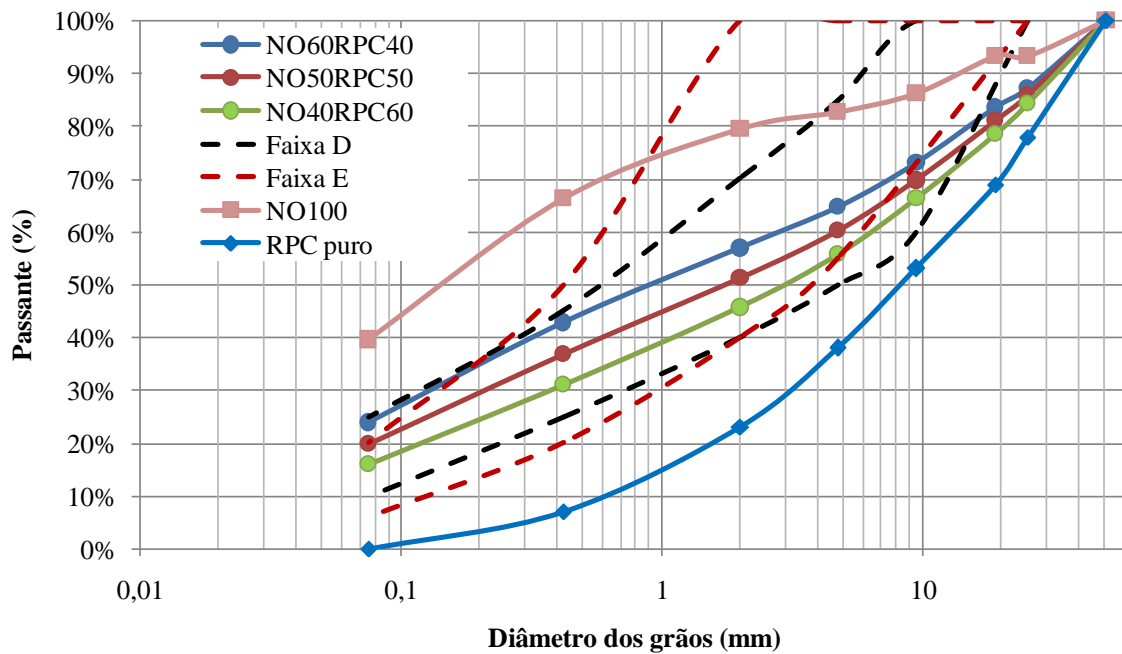
As informações referentes à caracterização do RPC serão mais bem apresentadas e discutidas no próximo item. De todo modo, o aspecto da sua curva granulométrica pode ser visualizado nas Figuras 24 e 25 que mostram as granulometrias para as misturas RPC + solos de Nova Olinda e Crato, respectivamente.

Figura 23 - Granulometria dos solos usados na estabilização com RPC.



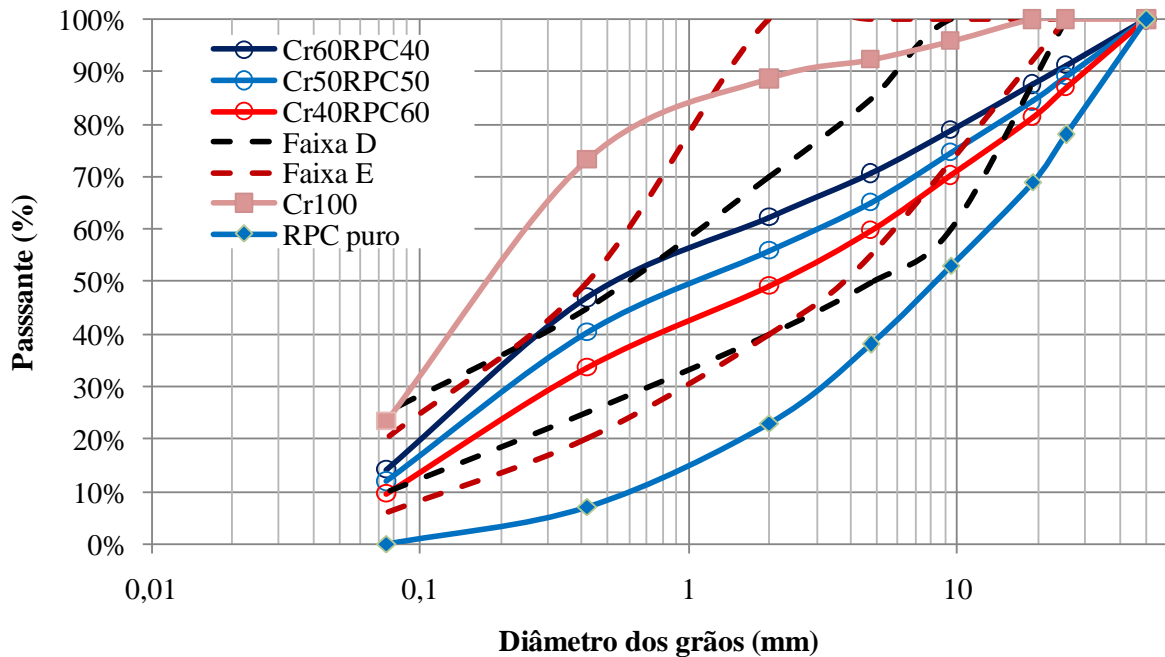
Fonte: Próprio autor.

Figura 24 - Enquadramento das curvas granulométricas das misturas com o solo de Nova Olinda e RPC.



Fonte: Próprio autor.

Figura 25 - Enquadramento das curvas granulométricas das misturas de solo do Crato e RPC.



Fonte: Próprio autor.

As misturas solo-resíduo e o resíduo puro foram submetidos aos ensaios de compactação, CBR e expansão, onde os resultados estão resumidos na Tabela 10. Observou-se não haver incremento de resistência nos solos a partir do acréscimo de resíduo da Pedra Cariri. À medida que se adicionou o resíduo, houve um pequeno decréscimo nos valores de CBR para o solo arenoso, enquanto não foram observadas mudanças consideráveis no solo argiloso.

As curvas de compactação das misturas evidenciam não haver variação no valor da massa específica seca máxima entre si, e um leve acréscimo na umidade ótima pelo acréscimo de resíduo (ver Tabela 11). O acréscimo da umidade pode ser explicado pela presença do material fino do resíduo que aumenta a superfície específica e aumenta a adsorção de água. Para o solo do Crato, a granulometria natural do resíduo promoveu uma leve queda no valor de massa específica máxima seca, enquanto que para o solo de Nova Olinda um pequeno aumento. As curvas de compactação das misturas podem ser observadas nas Figuras 26 e 27.

A umidade ótima do solo arenoso sobe de 8,6% para 10% e continua subindo com o aumento do resíduo, enquanto a umidade do solo argiloso desce de 13,9% para 12,6% e tende a subir pelo acréscimo de resíduo.

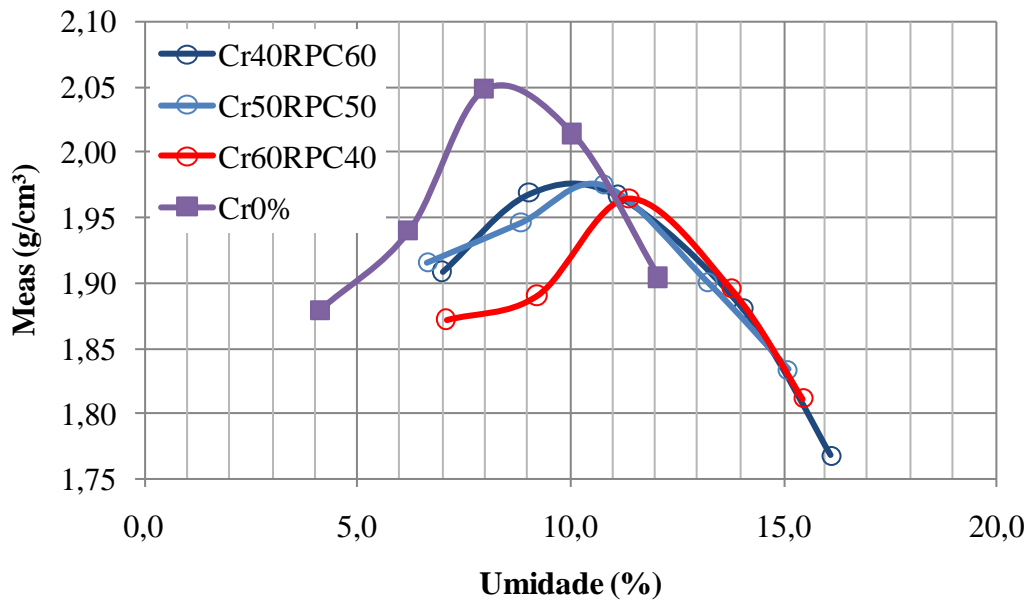
As misturas de solo/Resíduo Pedra Cariri não passaram por processo de cura seca antes da imersão, fato que poderia acarretar algum tipo de reação química e melhorar a os resultados de CBR.

Tabela 10 - Resumo das densidades máximas secas das misturas e suas umidades ótimas.

Misturas	γ_{Smax} (g/cm ³)	Hot (%)
Cr40RPC60	1,97	10,0
Cr50RPC50	1,98	10,6
Cr60RPC40	1,97	11,6
NO40RPC60	1,90	12,6
NO50RPC50	1,91	12,2
NO60RPC40	1,92	13,1

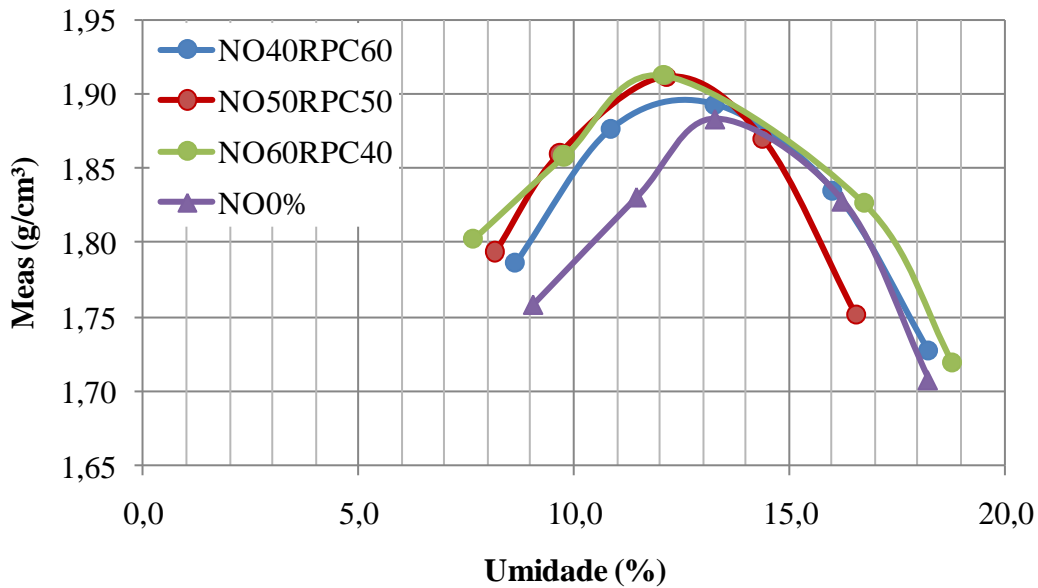
Fonte: Próprio autor.

Figura 26 – Curvas de compactação das misturas de solo arenoso e RPC.



Fonte: Próprio autor.

Figura 27 – Curvas de compactação das misturas de solo argiloso e RPC.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de CBR e expansão para as misturas solo/RPC.

Solo/Resíduo Pedra Cariri (RPC)	Expansão (%)	CBR (%)
Cr0%	0,01	39,7
Cr60RPC40	0,03	43,7
Cr50RPC50	0,02	33,2
Cr40RPC60	0,01	30,9
NO0%	0,05	23,3
NO60RPC40	0,03	24,6
NO50RPC50	0,04	25,2
NO40RPC60	0,00	25,4
RPC100%	0,02	60,0

Fonte: Próprio autor.

Os resultados apresentados, nesta primeira etapa, mostram que o RPC tem possibilidade de emprego em misturas com solos, tendo em vista a possibilidade de essas misturas serem empregadas pelo menos para compor as camadas de sub-base de pavimentos à luz dos métodos empíricos de dimensionamento. Essa aplicação pode representar uma solução para o consumo do grande volume de resíduos que se encontram depositados na RMC. Outra

questão importante, é que a depender da classificação ambiental do resíduo essa solução pode apresentar uma alternativa para diluir os contaminantes do RPC.

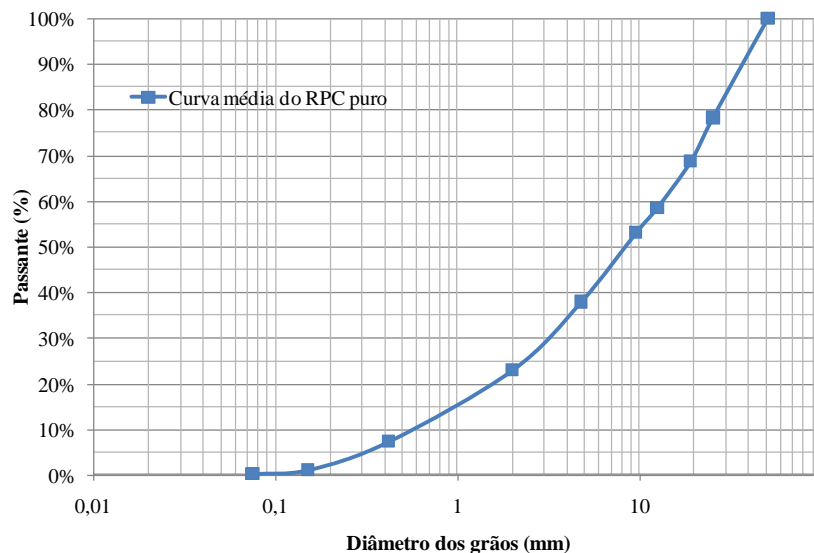
4.3 Resultados da Segunda Etapa - Avaliação do RPC Puro e Encaixados nas Curvas A, B, C e D do DNIT

Tendo em vista os excelentes resultados de CBR do RPC, obtidos na primeira etapa da pesquisa, resolveu-se partir para uma nova investigação que levasse em consideração o uso do RPC puro. Sendo assim, foram construídas em laboratório curvas constituídas de RPC que foram encaixadas nas curvas médias das faixas A, B, C e D do DNIT.

4.3.1 Análise Granulométrica

A curva granulométrica média do RPC pode ser vista na Figura 28. Essa curva foi obtida a partir da média de 7 curvas granulométricas.

Figura 28 - Análise granulométrica do RPC puro.



Fonte: Próprio autor.

É pertinente afirmar que possivelmente a granulometria varie de acordo com a fonte, pois as pilhas de resíduo são originadas de diferentes formas, por vezes do acúmulo de aparas geradas pelo corte das placas, pelo acúmulo de placas quebradas no momento da extração e outros tipos de produção de resíduo, ou seja, as pilhas de resíduo devem ser

heterogêneas e variadas em sua granulometria. No entanto, para as amostras coletadas a curva média granulométrica é representativa.

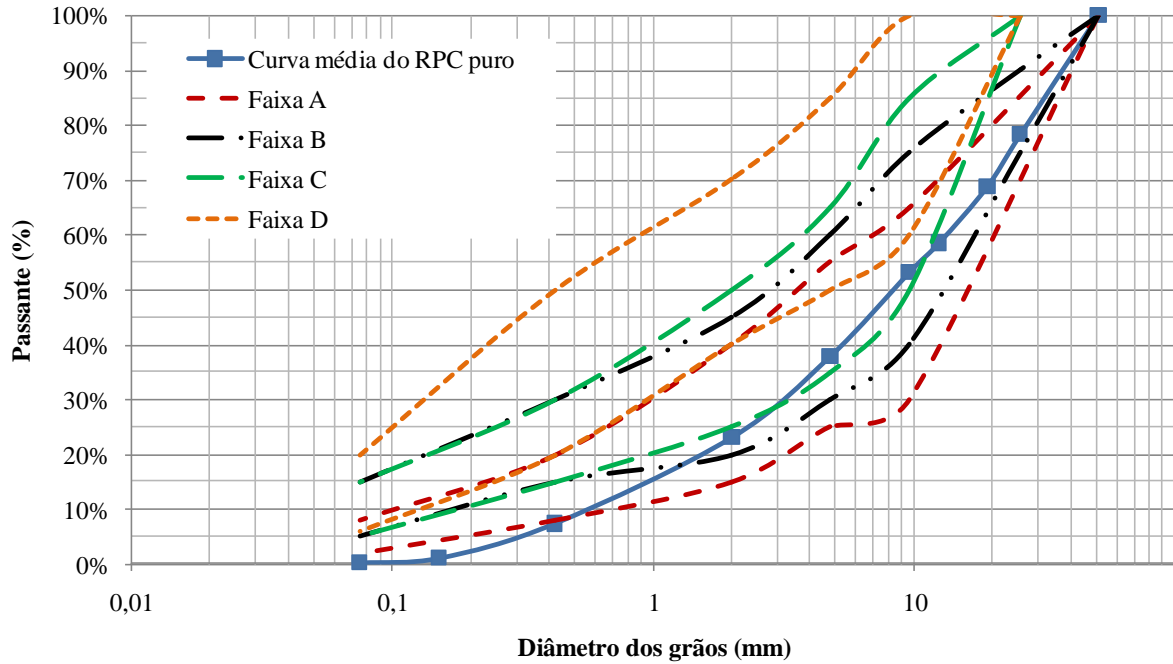
De acordo com a norma NBR 15115, as especificações para granulometria de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para pavimentação são uma curva bem graduada, não uniforme, com coeficiente de uniformidade $C_u \geq 10$ ($C_u = D_{60}/D_{10}$) e a porcentagem que passa na peneira 0,42 mm (nº 40) deve ficar entre 10% e 40%.

O RPC possui curva com dimensões de pedregulho, pois possui mais de 70% retido na peneira nº 10. O valor de C_u obtido foi de 19,1 e a porcentagem passante na peneira 0,42 mm (nº 40) foi de 7,6%. À luz dessas recomendações, o material não se enquadra como agregado para camadas granulares dos pavimentos, ressaltando-se que essa norma é indicada para RCD.

Para solos e materiais bem graduados são indicados os valores de $C_u > 3$ e $1 < C_c < 3$. O valor de $C_u=19,1$ e o valor de C_c de 1,6 permitem classificar a curva do RPC como bem graduada e desuniforme.

Plotaram-se as faixas granulométricas A, B, C e D propostas pela norma DNIT 141/2010 (Base Estabilizada Granulometricamente - Especificação de Serviço) para verificação do enquadramento da curva média do RPC. Como observado na Figura 29, a curva média do RPC enquadrou-se quase que totalmente na faixa A do DNIT para solos estabilizados granulometricamente. Observe-se que a menor quantidade de finos presentes no RPC faz com que ele se coloque fora do limite inferior da faixa A.

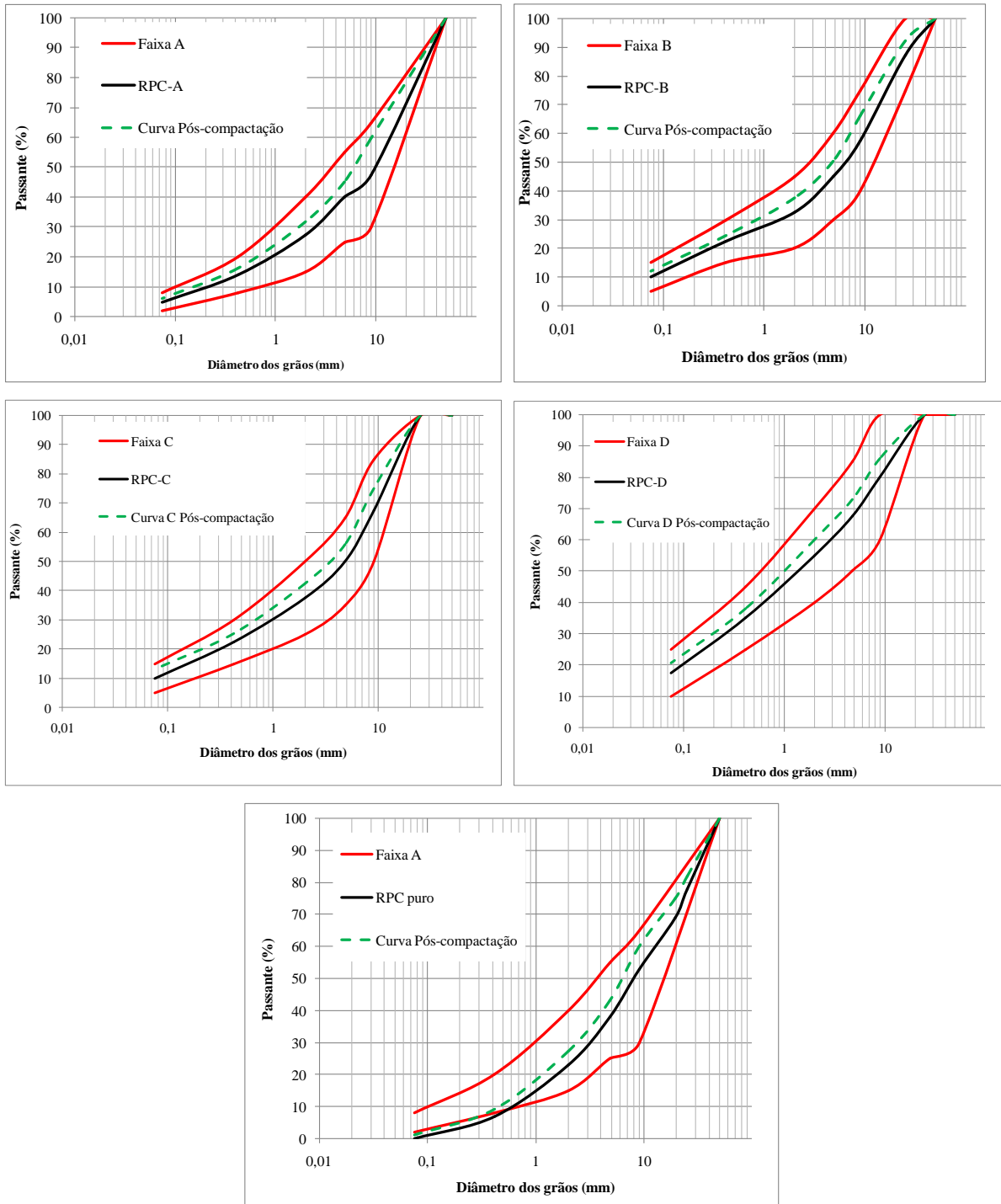
Figura 29 - Curva granulométrica do RPC puro com as faixas A, B, C e D do DNIT.



Fonte: Próprio autor.

Como ilustrado na Figura 30, as curvas se deslocaram de sua granulometria original, mas permaneceram ainda dentro da faixa, após a compactação.

Figura 30 - Granulometria após-compactação dos materiais RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D e RPC puro.



Fonte: Próprio autor.

Para analisar-se o comportamento do RPC puro e encaixado nas faixas granulométricas médias A, B, C e D do DNIT foram preparadas em laboratório diferentes granulometrias que foram nomeadas de RPC-A, RPC -B, RPC -C, RPC -D e RPC puro. Foi

realizada a análise granulométrica após a compactação desses materiais para observar se as curvas após compactação permaneceriam ainda dentro das suas respectivas faixas.

Destaque-se que a granulometria após compactação foi realizada a seco para sua melhor execução, empregando-se a energia de compactação intermediária. É possível que com o aumento da energia de compactação, as curvas se desloquem das originais e possam sair fora da faixa. Como observado e comprovado pelos ensaios de abrasão e IDp, cujos os resultados serão apresentados mais adiante, o material se fragmenta e produz muitos finos no momento da compactação. Observe-se também que a curva natural do RPC puro, após compactação, se deslocou para quase se enquadrar totalmente na faixa A.

4.3.2 Resultados de Fluorescência de Raios X

O presente autor realizou caracterização química através de fluorescência de raios X do RPC. Os resultados da análise química por fluorescência de raios X, como ilustrado na Tabela 12, mostram que o RPC possui valores semelhantes entre as amostras do presente estudo e o de Suassuna, Brasileiro e Prado (2012), como no caso dos óxidos de alumínio e cal.

Tabela 12 - Análise química do RPC realizada pelo autor deste trabalho.

Óxidos	RPC (%)
Al ₂ O ₃	0,93
SiO ₂	3,03
P ₂ O ₅	0,15
SO ₂	0,72
K ₂ O	0,37
CaO	87,43
MnO	0,81
Fe ₂ O ₃	5,67
CuO	0,18
ZnO	0,42
SrO	0,28

Fonte: Próprio autor.

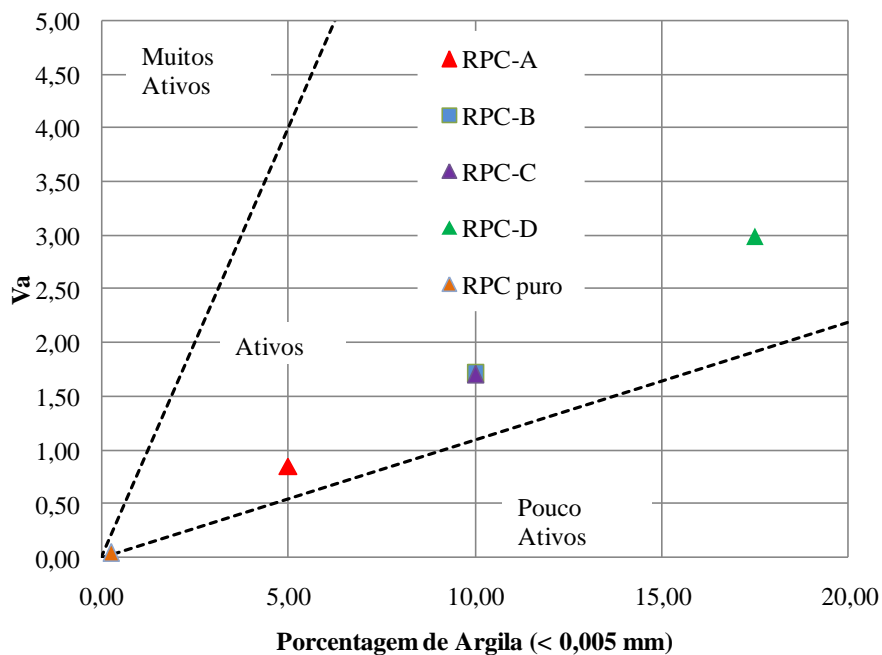
4.3.3. Adsorção de Azul de Metileno

Os resultados dos ensaios de azul de metileno podem ser observados na Figura 31, onde se verifica que os finos do RPC foram classificados como ativos e possuem mesmo coeficiente de atividade já que foram originados do mesmo material RPC. Observe que o RPC puro contém 0,28% passado na peneira de número 200.

O ensaio de adsorção de azul de metileno auxilia na classificação de solos tropicais que utilizam a metodologia MCT (Miniatura, Compactado e Tropical). Fabbri (1994) utilizou o ensaio de metileno pelo método da mancha para avaliar o consumo de corante em função da classe dos solos na classificação MCT. Ainda segundo Fabbri (1994), o grau ativo se enquadra no grupo dos argilo-minerais ilitas e caulinitas.

A atividade dos argilo-minerais pode apontar solos de comportamento laterítico ou não-laterítico, no caso os solos de comportamento não-laterítico possuem alta atividade e geralmente estão associados a altas expansões. A análise da fração fina do RPC por adsorção de azul de metileno pode justificar a baixa expansão do RPC, o que foi comprovado no ensaio de expansão do CBR, uma vez que o resíduo não possui atividade alta.

Figura 31 - Resultados do ensaio de azul de metileno para RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D e RPC puro.



Fonte: Próprio autor.

4.3.4 Abrasão Los Angeles

A abrasão Los Angeles foi determinada segundo a norma DNER-ME 035/98. Com a graduação F, o resultado para o material ensaiado foi de 75%. Sendo assim, o presente material pode ser considerado friável, pois se trata de uma rocha sedimentar calcária.

A norma DNIT 031/2006 fixa limites de 40% para o ensaio de Abrasão *Los Angeles* indicado para agregados usados na pavimentação. Na Tabela 13 estão dispostos valores de abrasão de tipos de rejeitos diferentes para efeito de comparação. Nesta Tabela, é visível verificar que Assis e Mello (2013) obtiveram um valor de Abrasão *Los Angeles* de 62% para um resíduo similar ao estudado no presente trabalho o que pode mostrar tendência do valor desta propriedade ser alta para rochas do tipo calcário. A abrasão obtida para o RPC, à luz da norma empregada, não o qualifica para ser usado como agregado na área de pavimentação.

Tabela 13 - Resumo dos valores de Abrasão Los Angeles obtidos na literatura para alguns resíduos

Resíduo	Autor	Abrasão	Aplicação
Calcário cristalino	Ribeiro <i>et al</i> (2007a)	36%	Mistura asfáltica
Rocha gnáissica	Ribeiro <i>et al</i> (2007b)	26%	Mistura asfáltica
Rocha granítica	Martin, Ribeiro e Correia (2008)	28%	Mistura asfáltica
RCD	Silva (2009)	33%	Estabilização de camadas granulares
Escória de aciaria	Tavares, Motta e Oda (2011)	22%	Mistura asfáltica descontínua
Calcário	Assis e Mello (2013)	62%	Mistura asfáltica
Ardósia	Rodrigues <i>et al</i> (2014)	22%	Mistura asfáltica
Calcário laminado	Próprio autor (2015)	75%	Camadas granulares

Fonte: Próprio autor.

4.3.5 Absorção

A absorção da Pedra Cariri apresentou teor médio de 6,9%. O material foi fracionado em três partes e a absorção de cada fração está apresentada na Tabela 14.

Para fins comparativos, outros valores de absorção de alguns agregados alternativos são elencados na Tabela 15 onde é possível observar que os valores de absorção do material se assemelham aos de natureza calcária, e é superior aos de RCD, o que é próprio de calcário cristalino. Não há na norma NBR 15115, para camadas de pavimento, um valor máximo recomendado de absorção. As rochas sedimentares, em particular os calcários laminados, são materiais porosos o que explica a alta absorção. Em campo, essa alta absorção pode aumentar o consumo de água e desta forma aumentar o custo da atividade, assim como a dificuldade no controle da umidade.

Tabela 14 - Resultados da absorção do RPC para cada fração analisada.

Absorção (%)	Fração (mm)
5,4	50
5,5	33
9,7	<33

Fonte: Próprio autor.

Tabela 15 - Resumo dos valores de absorção obtidos na literatura para alguns resíduos.

Tipo de resíduo	Autor	Absorção	Aplicação
RCD	Silva (2009)	5,1%	Estabilização de camadas granulares
Escória de aciaria	Tavares <i>et al</i> (2011)	4,7%	Mistura asfáltica descontínua
Calcário laminado	Pinto (2011)	7,7%	Estabilização de camadas granulares
Calcário	Assis e Mello (2013)	8,3%	Mistura asfáltica
Ardósia	Rodrigues <i>et al</i> (2014)	1,4%	Mistura asfáltica
Calcário laminado	Próprio autor (2015)	6,9%	Camadas granulares

Fonte: Próprio autor.

4.3.6 Índice de Forma

Segundo os resultados do ensaio de índice de forma, as partículas do resíduo foram consideradas lamelares. A própria natureza da rocha, sedimentar, depositada em camadas, proporciona a forma dos resíduos e esclarece a lamelaridade das partículas.

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), o valor do índice de forma para agregados usados na pavimentação deve ser maior que 0,5, sendo o resultado do presente material 0,1. Valores de índice de forma maiores que 0,5 indicam materiais cúbicos e/ou arredondados, os mais indicados para misturas asfálticas e camadas granulares, pois permitem entre si um intertravamento, o que proporciona um esqueleto mineral mais resistente.

4.3.7 Índice de Compactação após Compactação Proctor

O resultado obtido do Índice de Compactação após Compactação Proctor da amostra de Resíduo Pedra Cariri foi de 11,4. Isso demonstra que o material sofreu danos no momento da compactação devido à fragilidade inerente às rochas de calcário laminado. Esse resultado está de acordo com o obtido para o ensaio de abrasão Los Angeles, uma vez que o valor encontrado ultrapassou o aceitável. De acordo com o IPR (1998), o valor sugerido para este ensaio é de um $ID_p \leq 6$.

4.3.8 Resultados dos Ensaio Mecânicos dos RPC-A, B, C, D e Puro

4.3.8.1 Compactação, CBR e Expansão

Os parâmetros da compactação (umidade ótima - $H_{ót}$), massa específica aparente seca máxima - $\gamma_{S_{máx}}$), CBR e expansão estão apresentados na Tabela 16.

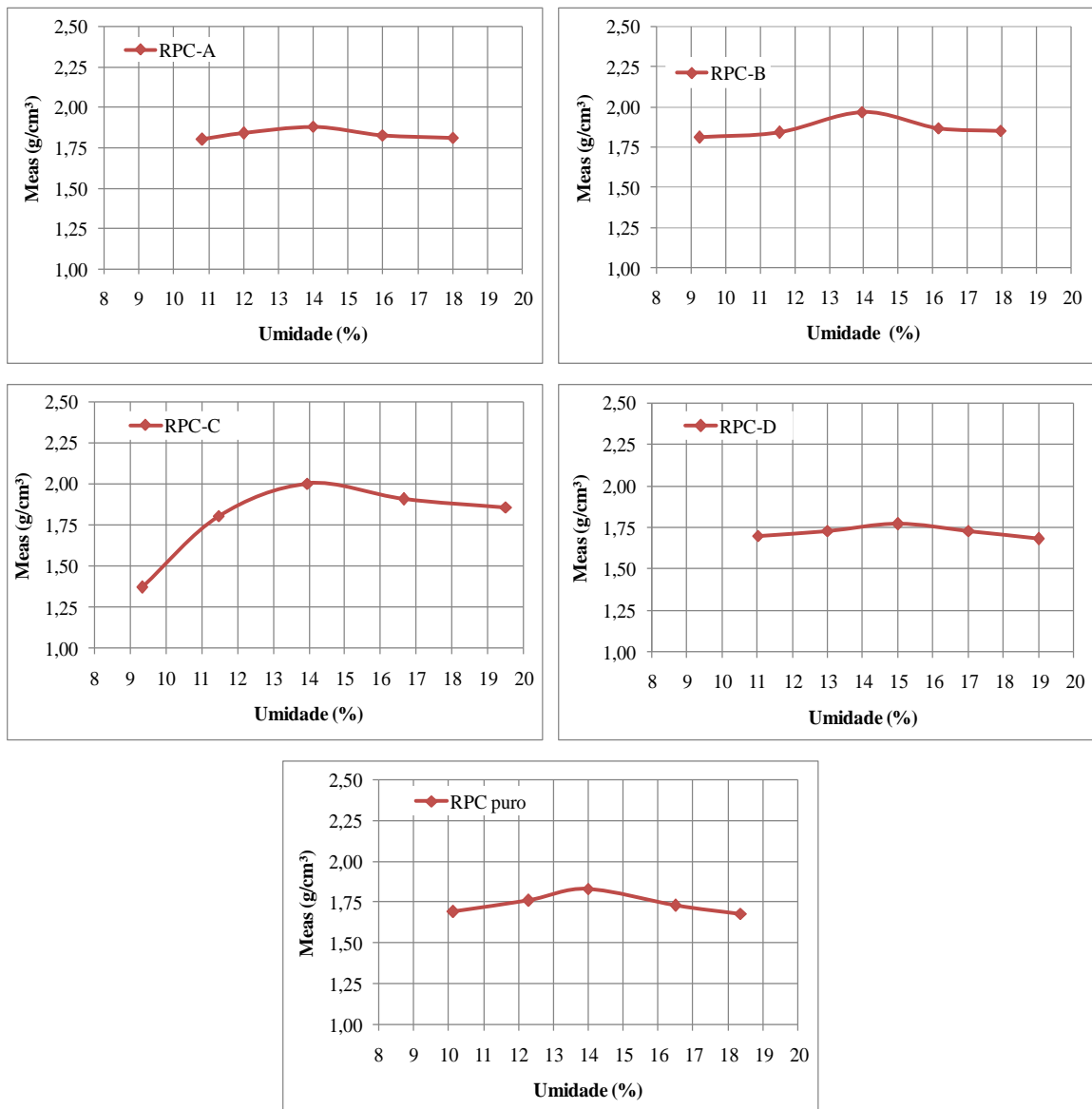
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de Proctor, CBR e expansão de RPC-A, B, C, D e puro.

RPC	Hót (%)	$\gamma_{S_{max}}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
RPC puro	14,0	1,83	61,6	0,02
RPC-A	14,0	1,88	35,0	0,03
RPC-B	14,2	1,97	21,0	0,03
RPC-C	15,5	1,91	24,0	0,01
RPC-D	15,8	1,77	8,00	0,00

Fonte: Próprio autor.

Os ensaios de compactação foram regidos pela norma DNER ME 164/2013, pois se o material fosse reaproveitado na compactação alteraria significativamente sua granulometria, uma vez que foi constatado que o resíduo é friável. As curvas de compactação dos RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D e RPC puro podem ser vistas na Figura 32. De um modo geral, observou-se que os resultados dos parâmetros de compactação para o RPC-A e RPC puro foram muito semelhantes.

Figura 32 - Curvas de compactação dos RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D e RPC puro.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados do ensaio de compactação indicam que com o aumento na porcentagem de finos, a massa específica aparente seca máxima (das curvas B, C e D) decresceu. Nas faixas estabilizadas do DNIT, os finos aumentam com a sequencia das faixas, de A para F. A curva D com a maior quantidade de finos apresentou a menor massa específica, o que já era esperado. A presença de finos a partir de certa quantidade deixa de preencher os vazios entre as partículas e passa a impedir o intertravamento dos grãos de diâmetros maiores, diminuindo assim a massa específica.

Outro ponto observado é o aumento da umidade com o aumento dos finos. Esse aumento é explicado pelo aumento da área superficial específica, fazendo com que mais água seja adicionada no momento da compactação.

O RPC é um material de trabalhabilidade difícil em laboratório, pois o controle de sua umidade é dificultado com a ausência de finos. Quanto menos finos, mais difícil a compactação, pois o material vai apresentando comportamento de agregado.

Com relação aos resultados do ensaio de CBR e expansão, verificou-se que o CBR do RPC puro é de 61,6% e o valor da sua expansão é de 0,02 %. Segundo a NBR 15115, um material para execução de sub-base deve possuir $CBR \geq 20\%$ e $expansão \leq 1\%$ (energia de compactação intermediária).

Os resultados de CBR e expansão das curvas preparadas (RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D) indicaram que elas podem ser usadas em camadas de sub-base, de acordo com o manual do DNIT, com exceção da curva D. Pode ser ainda observado que com o aumento da quantidade de finos, o valor de CBR do resíduo decresceu. Aparentemente, a melhor configuração granulométrica é a natural, que possui maior quantidade de fração grossa. Importante ressaltar que a expansão do RPC é muito baixa, mesmo com alta taxa de absorção e sendo a parte fina classificada como muito ativa no ensaio de adsorção de azul de metileno.

4.3.8.2 Módulo de Resiliência (MR)

Para a análise dos resultados dos ensaios de MR, foram utilizados os programas LABFit e o MATLAB. O LABFit, desenvolvido pela Universidade Federal de Campina Grande, é um software para Windows usado para tratamento e análise de dados experimentais e ajuste de curvas. O MATLAB é um software interativo voltado para o cálculo numérico, sendo a versão utilizada a do MATLAB 2010.

Para avaliar o comportamento resiliente das curvas granulométricas RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D e RPC puro se faz necessária uma análise comparativa entre os resultados de MR obtidos para cada uma dessas curvas e o teste dos melhores modelos que irão representar os seus comportamentos. Os modelos testados nesta pesquisa foram os modelos clássicos que descrevem comportamentos resilientes de solos. Esses modelos relacionam o MR com a tensão desvio (σ_d), com a tensão de confinamento (σ_3) e com o invariante de tensões ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$). Os parâmetros de modelagem (valores de k) e os coeficientes de correlação (R^2) são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resumo de valores de parâmetro de modelagem e coeficientes de correlação para os RPCs.

RPC	$MR=k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$			$MR=k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$			$MR=k_1 \cdot \theta^{k_2}$		
	k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	R^2
RPC puro	778,9	0,27060	0,78	546,9	0,19090	0,27	506,7	0,27860	0,65
RPC-A	202,7	0,02795	0,05	203,4	0,03772	0,06	195,5	0,03478	0,06
RPC-B	782,2	0,19180	0,18	578,4	0,08965	0,00	546,6	0,14000	0,08
RPC-C	282,4	0,12510	0,67	292,6	0,16780	0,63	244,9	0,16400	0,79
RPC-D	227,5	0,05510	0,30	227,5	0,05510	0,30	214,6	0,07530	0,38

Fonte: Próprio autor.

Os coeficientes de correlação dos modelos clássicos possuem valores considerados baixos, então se pode concluir que esses modelos não descrevem bem o comportamento do RCP. Isso pode ser observado em todos os materiais analisados. Buscando a uniformização da análise dos resultados, tratou-se ainda de testar o modelo composto, o qual é função das tensões de confinamento e desvio simultaneamente.

Os resultados dos valores dos parâmetros de modelagem e coeficientes de correlação do modelo composto podem ser verificados na Tabela 18. Foi observado que os valores de R^2 do modelo composto são superiores aos outros modelos, por isso ele foi o modelo escolhido para a avaliação dos MRs das curvas investigadas.

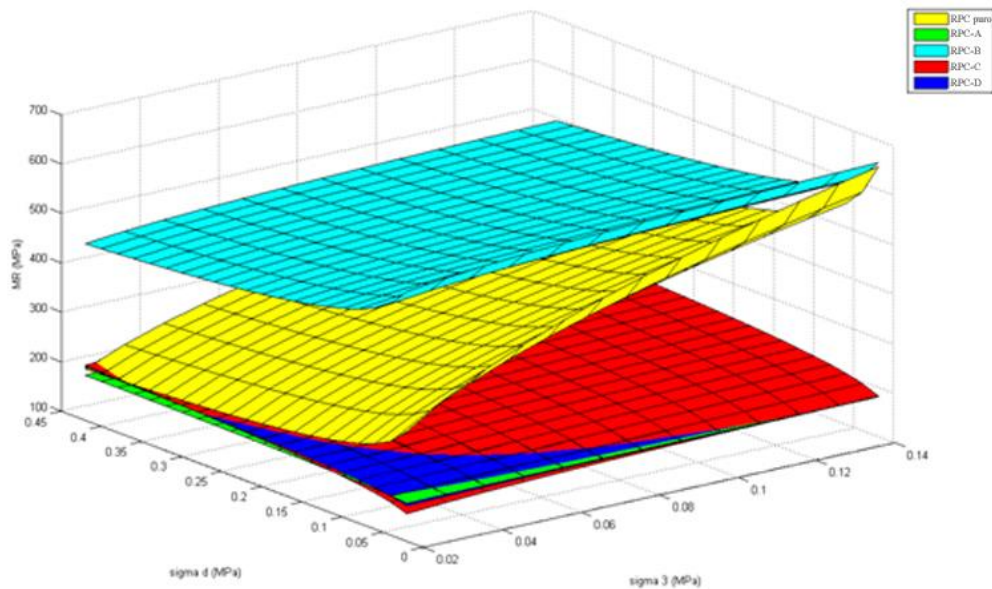
O modelo composto é representado por uma superfície, sendo necessário utilizar programas computacionais que permitam uma análise qualitativa dessas superfícies. A Figura 33 apresenta as superfícies que representam o comportamento resiliente dos RPC-A, RPC-B, RPC-C, RPC-D e RPC puro. Percebe-se que o RPC-B possui melhor comportamento mecânico em relação às outras curvas formuladas, com os maiores valores de MR, assim como maior estabilidade com a variação de tensão.

Tabela 18 - Parâmetros do modelo composto para os RPCs.

RPC	$MR=k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$			
	k1	k2	k3	R ²
RPC puro	726,80	0,36	-0,15	0,85
RPC-A	206,20	0,01	0,03	0,68
RPC-B	314,10	-0,07	-0,22	0,53
RPC-C	316,70	0,08	0,10	0,80
RPC-D	244,20	0,03	0,06	0,42

Fonte: Próprio autor.

Figura 33 - Superfícies das curvas dos diferentes RPCs para o caso do modelo composto.



Fonte: Próprio autor.

Ainda com relação à análise da Figura 33, percebe-se que as superfícies dos RPC-A, C e D estão praticamente superpostas o que pode indicar o mesmo comportamento resiliente para as mesmas. Esse fato pode, ainda, propor que tais composições granulométricas não produzem diferencial de comportamento mecânico.

A superfície da curva do RPC puro sofreu uma maior variação dos valores de MR com a tensão de confinamento. Por se tratar de material sem coesão natural, o aumento do confinamento pode elevar o MR. Talvez o esqueleto mineral da curva natural do RPC propicie esse diferencial, pois esse fenômeno não ocorre nas outras curvas.

De um modo geral, conclui-se na segunda etapa da pesquisa, à luz dos resultados de CBR, expansão e MR, que as melhores curvas a serem investigadas foram as do RPC puro e RPC-B, salientando que a escolha do RPC-B foi baseada apenas no MR. Essas duas curvas foram, na terceira etapa da pesquisa, misturadas com cimento.

4.4. Resultados da Terceira Etapa - Estabilização Química do RPC com Cimento

Conforme dito anteriormente, as curvas de melhor comportamento mecânico foram estabilizadas quimicamente com cimento. Na fase de dosagem, foram usados os teores de 2%, 5% e 7% de cimento, misturados com o RPC puro e RPC-B, com 7 dias de cura para a definição do teor ótimo de cimento e da melhor mistura. Após procedimento de dosagem e da definição do teor ótimo de cimento, as misturas RPC + cimento foram submetidas aos ensaios de RCS, RT, CBR e expansão após os tempos de cura de 1, 7 e 28 dias. Esses ensaios foram realizados para se observar o comportamento mecânico do resíduo para ser possivelmente aplicado em camada de base. Nos itens anteriores, é possível perceber que os experimentos já comprovaram que, do ponto de vista técnico e à luz do dimensionamento empírico, o RPC (com exceção do RPC-D) pode ser usado para camadas de sub-base.

4.4.1. Escolha do Teor Ótimo de Cimento e da Melhor Mistura com Cimento

A dosagem foi realizada, conforme a norma DNER ME 202/94, para os teores de 2%, 5% e 7% com as curvas consideradas de melhor desempenho mecânico nos ensaios de MR e CBR (RPC puro e RPC-B). Após cura de 7 dias, os Corpos de Prova (CPs) foram imersos em água durante 4 horas para a realização dos ensaios de RCS, sendo que alguns tiveram o topo capeados com gesso para se obter uma superfície plana antes do rompimento, outros não necessitaram pois já estavam planos, como se observa na Figura 34.

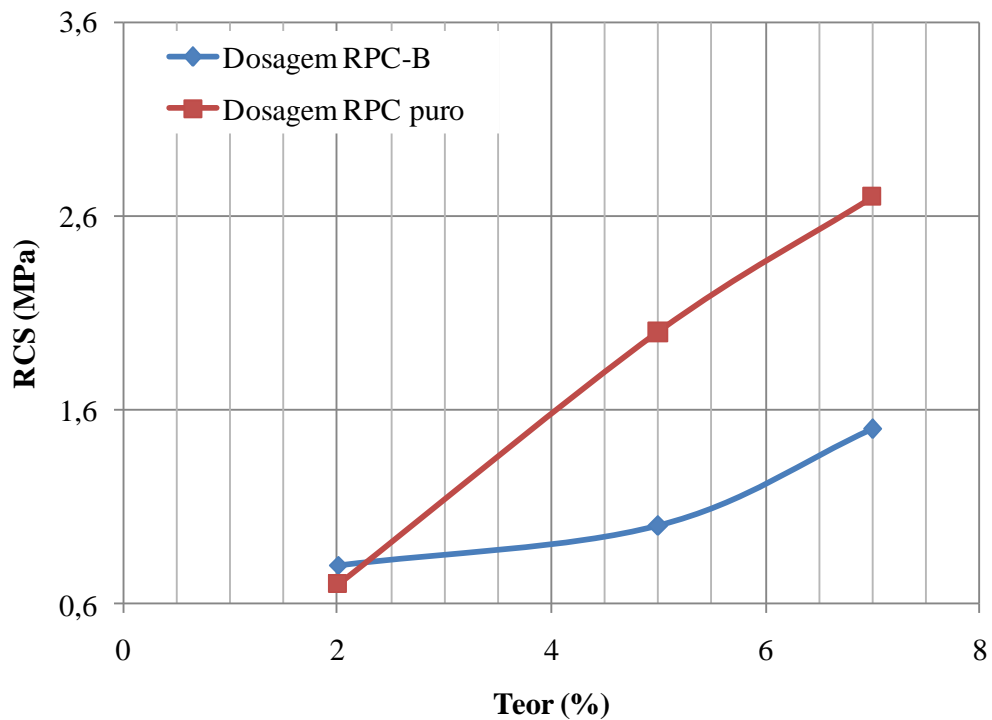
Segundo a ABNT (1992) NBR 12253 (Solo-Cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento), o menor teor que propicie uma RCS de 2,1 MPa deve ser o escolhido como teor ótimo. As curvas de RCS para as dosagens, do RPC puro e RPC-B, podem ser observadas na Figura 35. A curva com menor teor de cimento que alcançou a resistência de 2,1 MPa foi a curva natural do RPC. O teor de cimento para o RPC puro foi de 5,5% obtido por meio de interpolação.

Figura 34 - Procedimento de imersão, secagem superficial e rompimento dos CPs.



Fonte: Próprio autor.

Figura 35 - RCS para o RPC puro e RPC-B com teores de cimento de 2%, 5% e 7% para cura de 7 dias.



Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 35, foi percebido que a curva do RPC-B mesmo com teor de 7% não obteve resistência mínima de 2,1 MPa, alcançando valor máximo de 1,5 MPa. O fato de a curva do RPC puro ter tido melhor desempenho pode facilitar o manuseio de uma possível execução de camada, uma vez que não seria necessário um manejo de frações para se

criar uma curva. No entanto, não é viável afirmar que a curva obtida para o RPC puro encontrada neste trabalho seja a mesma em toda e qualquer pilha de RPC.

Sugere-se o emprego do material estabilizado com cimento com a configuração granulométrica utilizada na pesquisa, uma vez que não é possível garantir a uniformidade granulométrica do RPC nas pilhas de resíduos.

Assim, diante dos resultados apresentados na fase de dosagem desta etapa, selecionou-se o teor ótimo de 5,5% de cimento e a o RPC puro para ser submetidos aos ensaios de RCS, RT, CBR e expansão nos tempos de cura de 1, 7, e 28 dias que serão apresentados nos itens que se seguem.

4.4.2. Resultados da RCS para o RPC puro + Teor Ótimo de Cimento (5,5%)

Os ensaios foram realizados conforme a norma DNER ME 201/94 para misturas de solo-cimento. Os corpos-de-prova foram compactados na energia intermediária, na umidade ótima +0,5% sugerido pela norma. No intuito de compensar a perda de umidade durante a cura, os corpos de prova foram envolvidos em papel filme para evitar a perda de umidade e permitir sua cura. Para cada tempo de cura, os ensaios foram realizados em duplicata. Logo depois do período de cura efetuado, os corpos-de-prova foram rompidos na prensa. Os valores de RCS para cada tempo de cura estão expostos na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados da RCS para o RPC puro+5,5% de cimento nos tempos de cura de 1, 7 e 28 dias

RPC puro + 5,5% cimento	Cura (dias)	RCS (MPa)
	1	1,4
	7	2,3
	28	3,0

Fonte: Próprio autor.

Como esperado, o valor médio de RCS para 7 dias de cura com o teor de 5,5% de cimento foi superior ao mínimo requerido (2,1 MPa) resultando em 2,3 MPa. Ainda que o RPC possua estabilidade granulométrica suficiente para se usar em bases de baixo volume de tráfego ($CBR \geq 60\%$ e $N < 5 \times 10^6$), optou-se por acrescentar estabilizante químico (cimento) para verificar a melhora do RPC para uma possível aplicação em camadas de base para volumes de tráfego maiores e/ou para servir de encapsulante no caso do resíduo apresentar uma classificação ambiental perigosa.

O RPC puro obteve boa resposta à adição de cimento. A natureza química do RPC (material rico em calcário) pode ter contribuído para o melhor desempenho da mistura RPC/cimento. Segundo Bernucci *et al.* (2007) valores de RCS podem atingir até 8MPa.

4.4.3. Resultados da RT para o RPC puro + Teor Ótimo de Cimento (5,5%)

Os corpos de prova submetidos aos ensaios de RT foram rompidos e curados (1, 7 e 28 dias) conforme ilustrado na Figura 36. Os valores de RT, obtidos do RPCpuro+5,5% cimento, para os diferentes tempos de cura podem ser observados na Tabela 20.

Figura 36 - Ilustração da realização do ensaio de RT (medição e rompimento) para o RPC puro+5,5% cimento



Fonte: Próprio autor.

Tabela 20 - Resultados da RT para o RPC puro+5,5% de cimento nos tempos de cura de 1, 7 e 28 dias.

RPC puro + 5,5% cimento	Cura (dias)	RT (MPa)
	1	0,17
	7	0,37
	28	0,62

Fonte: Próprio autor.

Comparando os valores de RT de algumas misturas asfálticas convencionais investigadas no país (ver Tabela 21) com os valores obtidos para RPCpuro+5,5% cimento, percebe-se que os resultados obtidos foram satisfatórios. Também se observa que os valores de RT de misturas asfálticas são superiores ao RPC como esperado, e o acréscimo de cimento proporcionou um leve ganho de resistência à tração com o decorrer do tempo de cura. Segundo Bernucci *et al.* (2007) valores de resistência à tração de solo-cimento variam entre 0,6 a 2,0 MPa.

Tabela 21 - Valores de RT de misturas asfálticas investigadas no país.

Características	Faixa (publicação)	RT (MPa)
Concreto asfáltico – CAP 30/45	Faixa C (Soares <i>et al.</i> , 2000)	1,09
Concreto asfáltico – CAP 50/60		0,89
Concreto asfáltico – CAP 85/100		0,44

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2007).

4.4.4. Resultados do CBR e Expansão para o RPC puro + Teor Ótimo de Cimento (5,5%)

O CBR é um ensaio que não deve ser usado para misturas estabilizadas quimicamente, até sem estabilização, é um ensaio que fora do Brasil não é mais utilizado. Entretanto, para efeito do conhecimento do meio técnico que geralmente requer informações sobre esse parâmetro, resolveu-se investigar os valores obtidos para a mistura RPC puro+5,5% de cimento. Os resultados de CBR e expansão para os diferentes tempos de cura (1, 7 e 28 dias) são mostrados na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados do CBR e expansão para o RPC puro+5,5% de cimento nos tempos de cura de 1, 7 e 28 dias.

Cura (dias)	CBR (%)	Expansão (%)
1	301	0,0
7	292	0,0
28	300	0,0

Fonte: Próprio autor.

Observou-se que a mistura atingiu um valor de CBR = 300% com 28 dias de cura. Houve ganho de capacidade de suporte do RPC com o acréscimo de cimento quando comparado ao valor de CBR sem cimento. Alguns corpos de prova atingiram a carga máxima do equipamento no momento do rompimento. Todos os corpos de prova obedeceram ao processo de cura, sendo submetidos à imersão.

4.5. Resultados da Quarta Etapa - Dimensionamento de Pavimentos com o Uso do RPC e Análise Técnica e de Custo

Foram realizados dois tipos diferentes de dimensionamentos: o empírico e o mecanístico-empírico. O dimensionamento empírico foi realizado segundo o método de projeto de pavimentos flexíveis contido no manual DNER (1981). O dimensionamento mecanístico-empírico foi realizado utilizando-se de um software de dimensionamento, o SISPAV 2009, usando valores de MR para as camadas analisadas.

4.5.1. Método Empírico do CBR

O método de projeto de pavimentos flexíveis (DNER, 1981) tem por critério básico, o uso de camadas granulares colocadas sobre o subleito de maneira a proteger esse de ruptura por cisalhamento. O método consiste basicamente em se obter a espessura das camadas granulares, conhecendo-se o CBR do subleito.

Para o método empírico, nas duas rodovias hipotéticas, decidiu-se arbitrar um mesmo valor de CBR de subleito de 15%, e atribuir dois tráfegos diferentes: um com um número $N < 5 \times 10^6$, que requer um $CBR \geq 60\%$ para a base e outro com um número $N > 5 \times 10^6$ para base com $CBR \geq 80\%$. Para a primeira condição de tráfego será empregado o RPC natural, enquanto na segunda condição será considerado o RPC estabilizado com cimento.

Para a primeira condição de tráfego, foi considerado um número N de 2×10^6 , pois a sugestão seria uma rodovia que não exigisse uma base com CBR de 80%. Supondo um CBR de subleito de 15%, têm-se uma camada total de 30 cm. Obtendo assim um revestimento asfáltico de 5 cm, com 20 cm de base de RPC e uma camada de sub-base com espessura mínima de 10 cm de material granular com CBR de 20%, totalizando 35 cm, o que pode ser observado na Tabela 23 e visualizado na Figura 37.

Preferiu-se empregar uma camada de 20 cm de base de RPC para aumentar o consumo desse resíduo. A camada de sub-base poderia ser qualquer mistura, ou solo natural (Cr e NO), que neste trabalho foram testadas e atingiram o valor mínimo de 20% de CBR e expansão máxima de 1% (por exemplo, as misturas NO50RPC50, Cr50RPC50 ou os solos naturais de Nova Olinda e Crato).

Tabela 23 - Dimensionamento empírico de pavimento com RPC sem cimento para $N=2 \times 10^6$.

Camada	Espessura (cm)	CBR (%)
Revestimento	5	-
Base	20	60
Sub-base	10	20
Subleito	∞	15

Fonte: Próprio autor.

Figura 37 - Desenho esquemático da estrutura com RPC sem cimento para $N=2 \times 10^6$.



Fonte: Próprio autor.

Para um número $N=7 \times 10^6$ e um CBR do subleito de 15%, calculou-se que a espessura total do pavimento é de 32 cm. O pavimento projetado tem um revestimento asfáltico de 7,5 cm, com 15 cm de base de RPC com 5,5% de cimento e uma camada de

sub-base com espessura de 10 cm, totalizando 32,5 cm que pode ser observado na Tabela 24 e visualizado em um esquema da estrutura na Figura 38. Para esse cálculo, convém informar que o coeficiente usado para o cálculo do coeficiente de equivalência estrutural da base foi feito com relação ao solo-cimento, com resistência à compressão a 7 dias entre 28 e 21 kg/cm², gerando um coeficiente k de 1,2.

Tabela 24 - Dimensionamento empírico de pavimento com RPC com cimento para $N=7 \times 10^6$.

Camada	Espessura (cm)	CBR (%) / RCS
Revestimento	7,5	-
Base	15	RCS mínimo de 2,1 MPa
Sub-base	10	CBR = 20
Subleito	∞	CBR = 15

Fonte: Próprio autor.

Figura 38 - Ilustração da estrutura com RPC com cimento para $N=7 \times 10^6$.



Fonte: Próprio autor.

4.5.2. Método Mecânico-Empírico

O método mecânico-empírico é um processo que envolve o conhecimento de variáveis de difícil previsão e modelagem. Apesar do avanço das pesquisas e das técnicas, o fator calibração entre o campo e o laboratório, ponto onde se encontra o empirismo, ainda não deixou de ser utilizado. O método consiste em fazer análise de deformações/tensões para estabelecer as espessuras necessárias de acordo com os parâmetros alimentados no programa como Módulo de Resiliência, coeficiente de Poisson, dentre outros.

Dois dimensionamentos foram realizados com o programa SISPAV 2009, um com a estrutura usando RPC puro como base e outro usando RPC-B também como base, ambos para o mesmo tráfego. Não foi possível realizar dimensionamento com RPC + cimento, pois o equipamento de MR estava impossibilitado de se usar. Na época da conclusão dos trabalhos de laboratório, foram detectadas falhas na medição da tensão confinante e foi necessária a compra de uma válvula nova para a medição do σ_3 . Dessa forma não se obteve resultados de MR para viabilizar o dimensionamento mecanístico-empírico das misturas com cimento.

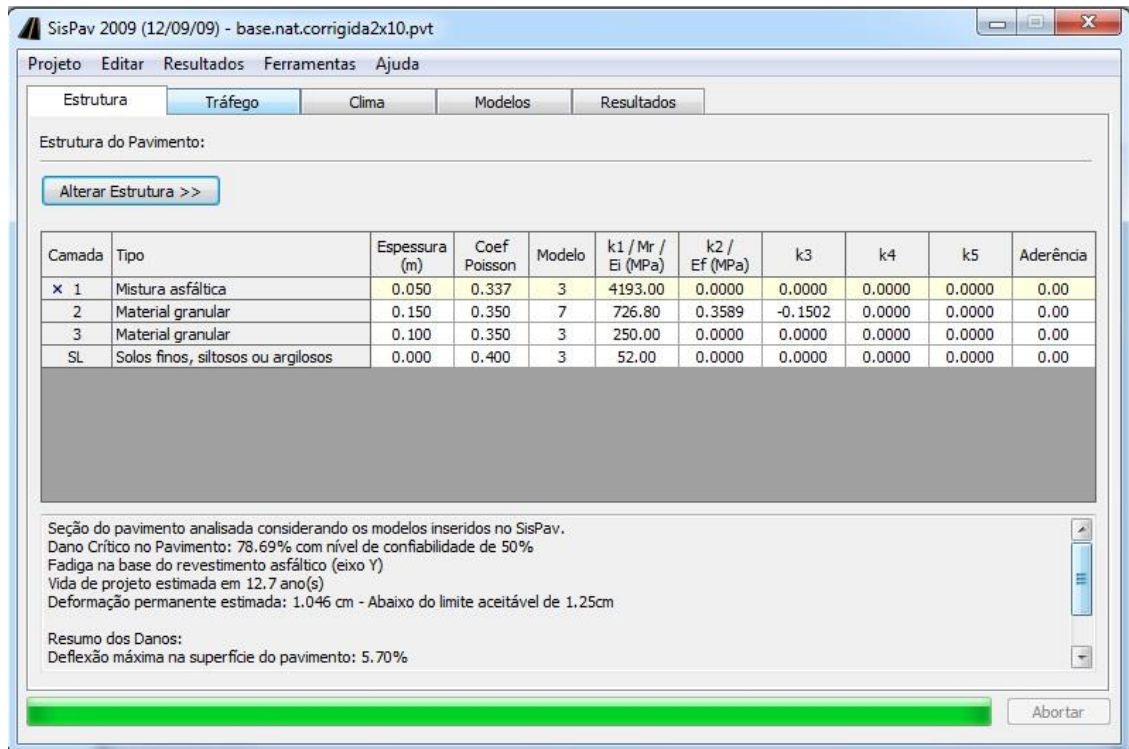
O pavimento com base de RPC puro teve seus parâmetros k_1 , k_2 e k_3 extraídos do modelo composto e foram implantados no programa SISPAV e o número N usado no programa foi de $2,5 \times 10^6$, utilizando-se o clima de Fortaleza, pois era a alternativa mais viável oferecida pelo programa. A estrutura do pavimento foi constituída de revestimento, base e sub-base (ver Figura 39). Pela Figura 40 tem-se que a vida de projeto está de acordo com o determinado no projeto de acordo com os parâmetros do programa, ou seja, igual ou acima de 10 anos (no caso 12,7 anos) e a deformação permanente também se encontra abaixo do máximo estabelecido no programa, 1,25 cm de acordo com os critérios adotados pelo software.

Figura 39 - Ilustração da estrutura proposta para a base de RPC puro pelo método mecanístico-empírico para $N=2,5 \times 10^6$.



Fonte: Próprio autor.

Figura 40 - Tela do dimensionamento do pavimento de base de RPC puro pelo SISPAV.



Fonte: próprio autor.

As espessuras determinadas foram: 5 cm para o revestimento, 15 cm de base de RPC puro e 10 cm de sub-base de material granular (espessura mínima) com MR médio de 250 MPa. O valor de MR da sub-base foi retirado de valor médio encontrado em sub-bases granulares brasileiras segundo Bernucci *et al.* (2007).

O pavimento com base de RPC-B também teve seus parâmetros k_1 , k_2 e k_3 do modelo composto implantados no programa SISPAV, o número N e clima foram os mesmos usados no pavimento com base de RPC puro. A estrutura do pavimento foi composta pelas camadas de revestimento, base e sub-base (ver Figura 41).

Figura 41 - Desenho esquemático da estrutura proposta para a base de RPC-B pelo método mecanístico-empírico



Fonte: Próprio autor.

As camadas ficaram com as espessuras mínimas estabelecidas. Para o revestimento, a espessura mínima determinada no programa foi de 5 cm. Para as camadas granulares de base e sub-base, a espessura mínima obtida foi de 10 cm, segundo normativo do DNIT. A vida de projeto provavelmente elevada pode indicar que seja superior a de projeto, assim como deformação permanente abaixo do valor limite aceitável. Pela Figura 42, o programa informou que a deformação permanente também se encontra abaixo do máximo estabelecido no programa, 1,25 cm.

O pavimento com base de RPC-B obteve um desempenho um pouco melhor nas mesmas condições de carregamento e clima impostas aos dois pavimentos. Salientando que a curva B obteve melhor comportamento de deformabilidade segundo resultados do ensaio de MR.

Os pavimentos de base de RPC, sem cimento, dimensionados pelo método mecanístico-empírico, sob condições de carregamento semelhante ($N=2,5 \times 10^6$), apresentaram composição um pouco mais delgada em relação ao pavimento dimensionado pelo método empírico.

Figura 42 - Tela do dimensionamento do Pavimento da base de RPC-B pelo SISPAV.

SisPav 2009 (12/09/09) - base.B.2x10.corrigido.pvt

Projeto Editar Resultados Ferramentas Ajuda

Estrutura Tráfego Clima Modelos Resultados

Estrutura do Pavimento:

Alterar Estrutura >>

Camada	Tipo	Espessura (m)	Coef Poisson	Modelo	k1 / Mr / Ei (MPa)	k2 / Ef (MPa)	k3	k4	k5	Aderência
x 1	Mistura asfáltica	0.0500	0.337	3	4193.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
2	Material granular	0.100	0.350	7	314.10	-0.0784	-0.2186	0.0000	0.0000	0.00
3	Material granular	0.100	0.350	3	250.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
SL	Solos finos, siltosos ou argilosos	0.000	0.400	3	52.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00

Seção do pavimento analisada considerando os modelos inseridos no SisPav.
 Dano Crítico no Pavimento: 13.20% com nível de confiabilidade de 50%
 Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)
 Vida de Projeto provavelmente elevada.
 Deformação permanente estimada: 1.101 cm - Abaixo do limite aceitável de 1.25cm

Resumo dos Danos:
 Deflexão máxima na superfície do pavimento: 4.20%

Abortar

Fonte: próprio autor.

4.5.3 Análise Técnica e de Custo

Para a jazida estudada no presente trabalho, os resultados da análise técnica permitem afirmar que o RPC é um material pedregulhoso, lamelar, friável, de alta absorção e de fração fina reativa. À luz das características desejáveis para a construção e execução de revestimentos flexíveis, a fração grossa do resíduo é inadequada.

No entanto, para a construção de camadas granulares de pavimento, este resíduo pode ser usado na sub-base e até em camadas de base de baixo volume de tráfego, pois tem valor de CBR e expansão dentro dos padrões exigidos por norma, respeitada a curva granulométrica natural encontrada na jazida explorada pelo presente autor.

As curvas construídas a partir das faixas A, B e C podem ser indicadas para camadas de sub-base. As curvas com melhor desempenho técnico foram as curvas B e natural. Após estabilização química com cimento, o RPC puro obteve o melhor desempenho, podendo ser utilizado em camada de base para rodovias com um volume de tráfego que possui um número $N > 5 \times 10^6$.

Para carregamentos com número $N < 5 \times 10^6$, de acordo com dimensionamento realizado no presente estudo, o RPC pode ser usado como material de base, tomando as precauções de seguir a curva granulométrica e cautelas no momento da compactação, pois ultrapassando demasiadamente a energia de compactação o material pode fragmentar-se e eventualmente mudar sua granulometria.

Para a avaliação de custo, partiu-se do pressuposto que o RPC será vendido e o valor será o mesmo oferecido à IBACIP: R\$ 0,20/tonelada. Para referência de valores foi utilizada a tabela de custos da SEINFRA (Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará - sem desoneração).

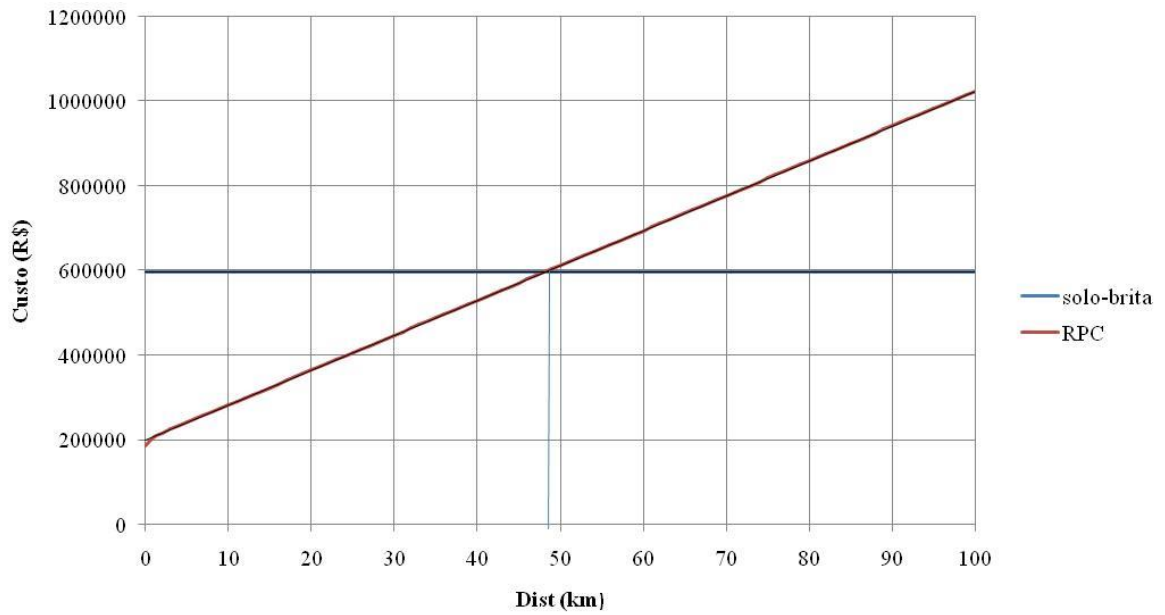
Uma obra de pavimentação fictícia foi idealizada na cidade do Crato que dista 40,2 quilômetros de Nova Olinda. Nessa simulação, foram avaliados os preços de construção de uma base feita de solo + brita, típica da região de estudo, e uma base de RPC (partindo de uma distância média de transporte arbitrada e superior a 30 km). O preço foi expresso em reais por metro cúbico de camada executada.

Nesta obra fictícia, estipulou-se um volume total de 10.223,4 m³ de material para uma camada de base. A composição do custo de execução de base de RPC baseou-se na construção de camada de base estabilizada granulometricamente de solos sem mistura de materiais (S/TRANSP) acrescido do valor de aquisição do RPC.

Para a construção da base de solo-brita, optou-se por uma base de solo-brita com 40% de brita (S/TRANSP), e para efeitos de cálculo e simulação o transporte dos materiais desta camada são nulos. O valor desta camada executada custou R\$ 597.966,7 enquanto o valor da base de RPC custou R\$ 185.397,4. Comparando os custos, percebe-se uma diferença considerável. Essa redução pode apresentar uma economia de quase 69%.

Contudo, existe uma distância máxima de transporte para que compense ao construtor o uso do RPC. Para essa composição, utilizou-se a referência no SEINFRA de transportes para obras rodoviárias, transporte local com DMT superior a 30 km.

A Figura 43 mostra o aumento do custo do RPC com o aumento da distância de transporte. A distância em que o resíduo se torna inviável em termos de custos é considerável. A partir de 48 km, o custo de transporte não compensa mais em relação ao uso de RPC como material para camada de pavimento.

Figura 43 - Análise da viabilidade do Custo \times Distância de Transporte do RPC.

Fonte: Próprio autor.

4.6 Considerações Finais

Neste capítulo, foram detalhados e discutidos os resultados dos ensaios realizados no presente trabalho. O próximo capítulo apresentará as principais conclusões sobre os mesmos, bem como recomendações para estudos futuros.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, as conclusões apresentadas estão baseadas nas análises dos resultados encontrados pelos ensaios realizados durante a presente pesquisa. Observe-se que todas as conclusões aqui extraídas estão limitadas ao universo das amostras estudadas pelo presente autor. Uma lista de sugestões para trabalhos futuros também será apresentada.

5.2 Principais Conclusões

Com os dados obtidos a partir dos ensaios de laboratório realizados nesta pesquisa tem-se que:

- Na etapa de estabilização granulométrica dos solos, verificou-se que o RPC pode ser empregado em misturas com solos para, pelo menos, compor as camadas de sub-base de pavimentos à luz dos métodos empíricos de dimensionamento. Essa aplicação pode representar uma solução para o consumo do grande volume de resíduos que se encontram depositados na RMC. Outra questão importante, é que a depender da classificação ambiental do resíduo essa solução pode representar uma alternativa para diluir os contaminantes do RPC.
- O RPC puro coletado apresentou comportamento mecânico satisfatório, uma vez que apresentou valor de CBR de 60% e expansão de 0,02%, podendo ser usado em camadas de base de rodovias de baixo volume de tráfego quando se considera o método empírico de dimensionamento do DNIT.
- O RPC se mostrou muito frágil em relação ao ensaio de abrasão, apresentando um valor de 75% e um valor de IDp de 11,6 considerado alto em relação ao recomendado ($IDp \leq 6$). Esse fato é explicado pela origem calcária da rocha. Apesar de sua fragilidade em relação ao dano sofrido no momento da compactação, esse dano não é suficiente para desenquadrar as curvas construídas e encaixadas dentro das faixas granulométricas A, B, C e D do DNIT.
- O RPC também apresentou absorção alta (média de 7%) quando comparado aos outros agregados utilizados na pavimentação. No entanto, possui baixa expansão quando

submetido à imersão, também devido à natureza da rocha, calcários laminados são materiais porosos.

- As curvas de RPC formadas nas faixas A, B e C do DNIT podem ser utilizadas em camada de sub-base à luz do método empírico de dimensionamento do DNIT.
- De acordo com os resultados do ensaio de MR, a curva B é a curva com melhor desempenho mecânico e as curvas A, C e D possuem comportamentos resilientes similares.
- O RPC puro + 5,5% de cimento pode ser usado em camada de base para rodovia com número $N > 5 \times 10^6$ em função dos resultados de RCS.
- No dimensionamento de pavimentos contendo RPC, carregamentos que indicam baixo volume de tráfego produzem estruturas com espessuras mínimas e vida útil de projeto satisfatório, assim como deformações permanentes dentro dos limites aceitáveis, usados tanto como material de sub-base e base.
- Pavimentos de base de RPC estabilizado com cimento, segundo dimensionamento empírico realizado neste estudo, podem ser usados para tráfegos que causam carregamento maior que $10^7 > N > 5 \times 10^6$, no caso deste estudo, sem a utilização de muitas camadas.
- Do ponto de vista da análise de custos, ficou observado que acima de 48 quilômetros de distância, o emprego do RPC se torna inviável. Abaixo dessa DMT, o custo de aquisição e execução é mais econômico do que os de camadas convencionais.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar análise ambiental no resíduo para verificar sua viabilidade na pavimentação como material que não ofereça riscos ao meio ambiente.
- Propor estabilização granulométrica de solos finos com a fração “arenosa” do RPC. A fração com diâmetro similar ao da areia pode ser misturado para ajudar no problema de altos índices de plasticidade e/ou diminuïrem os limites de liquidez de certos solos finos.
- Analisar o comportamento da fração fïler do RPC em misturas asfálticas. A composição química rica em calcário do RPC pode efetuar melhorias nas misturas asfálticas.

- Verificar o efeito de energias mais altas de compactação na variação das propriedades mecânicas do RPC.
- Construir trechos experimentais com RPC e analisar o seu comportamento ao longo do tempo e tráfego.

REFERÊNCIAS

- ABDOU, M. R.; BERNUCCI, L. L. B. **Pavimento ecológico: uma opção para a pavimentação de vias das grandes cidades**, 2005. Disponível em < http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/pavimento_ecologico.pdf >. Acesso em: 28 abr. 2015.
- ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Balança Comercial**. Disponível em < <http://www.abirochas.com.br/> >. Acesso em 29 out. 2014.
- ALENCAR-LINARD, Z. Ú. S; LIMA, P. V. P. S; SAEED-KHAN, A. Percepções dos impactos ambientais da indústria de cerâmica no município de Crato estado do Ceará, Brasil. *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. xv, núm. 48, p. 397-423, 2015. Disponível em: < <http://www2.cmq.edu.mx/revista-est/index.php/est/article/view/596/1073>>. Acesso em: 05 mai. 2015.
- ALVES, M. S. **Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos**, 2008. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia da UFMG, Programa de Pós-graduação em Construção Civil, 2008. Disponível em: < <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/ISMS-7HXJ25> >. Acesso em: 11 abr. 2015
- ARAÚJO, W. E. L. **Aproveitamento de resíduos da extração de micaxisto em pavimentos flexíveis**, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.
- ARRUDA, C. M. R. **Aplicação de resíduos de rochas ornamentais como carga para a fabricação de compósitos de matriz polimérica**, 2014. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 12253** (1992). *Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada em pavimento*. Procedimento, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 15012** (2003). *Rochas para revestimentos de edificações*. Terminologia, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 15115** (2004). *Agregados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação*. Procedimentos, 2004.
- BABISK, M. P. **Desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de rochas ornamentais**, 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2009.

BARROS, K. S.; CAVALCANTE, F. C. I. T.; BARROSO, S. H. A. **Avaliação do emprego de solo contaminado por derivados de petróleo em camadas granulares de pavimentos utilizando a cal como agente estabilizante.** Disponível em: < <https://docplayer.com.br/46730220-Avaliacao-do-emprego-de-solo-contaminado-por-derivados-de-petroleo-em-camadas-granulares-de-pavimentos-utilizando-a-cal-como-agente-estabilizante.html>>. Acesso em: 20 mai. 2014

BASTOS, J. B. S. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza**, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

BERNUCCI, L. L. B. *et al.* (2007). **Pavimentação Asfáltica** - Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA.

BRAGA FILHO, A. C.; ARAÚJO, R. M.; SOARES, J. B. Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a utilização do rejeito da exploração de calcário laminado como agregado. *In: ENCONTRO DE ASFALTO*, 18., Rio de Janeiro, 2006. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2006. Disponível em: < http://www.det.ufc.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=196&Itemid=143>. Acesso em: 19 mai. 2014.

CAMPOS, A. R. *et al.* Tratamento e aproveitamento de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*, 23., 2009, Fortaleza. **Anais...** Ceará: CETEM, 2009. Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/1474/23simpgeol200916-25.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

CARVALHO, E. A. *et al.* Aproveitamento dos resíduos finos das serrarias de Santo Antônio. *In: SEMINÁRIO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DA MINERAÇÃO*, 1., 2003, Salvador. **Anais...** Bahia: CETEM, 2003. Disponível em: < http://www.redeaplmineral.org.br/biblioteca/rochas-ornamentais/Aproveita_Finos_Padua2.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2015.

CARVALHO, M. R. S.; RIBEIRO, R. C. C.; CARRISSO, R. C. C. Utilização do Rejeito do Corte de Granito em Pavimentação Asfáltica. *In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 14., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM, 2006. Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/718>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

CEARÁ. Diário Oficial do Estado, Série 3, Ano I, n. 121. Caderno 1/2. **Lei Complementar n. 78**. Fortaleza, 2009. Disponível em: < <http://imagens.seplag.ce.gov.br/PDF/20090703/do20090703p01.pdf>>. Acesso em: 11 de set. 2014.

CONCEIÇÃO, M. N. *et al.* Estudos Preliminares da Utilização de Resíduos Oriundos do Beneficiamento da Pedra Sabão em Pavimentação Asfáltica. *In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 17., Rio de Janeiro, 2009. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM, 2009. Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/492>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

CONCEIÇÃO, M. N. *et al.* Avaliação Mecânica e Acústica do Pavimento Asfáltico Formado com Resíduos Oriundos do Beneficiamento de Rochas Ornamentais. *In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 18., Rio de Janeiro, 2010. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/541> >. Acesso em: 12 abr. 2015

CORREIA, J. C. G; VIDAL, F. W. H; RIBEIRO, R. C. C. Caracterização tecnológica dos calcários do Cariri do Ceará. *In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE*, 5., Recife, 2005. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM, 2006. Disponível em: < <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2006-003-00.pdf> >. Acesso em: 15 jun. 2014.

CORREIA, B. R. B. *et al.* Tecnologia limpa como estratégia para o desenvolvimento regional sustentado: uma discussão sobre o setor industrial do triângulo Crajubar – CE. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 27. Foz do Iguaçu, 2007. **Anais...** Disponível em: < http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_TR680488_0176.pdf >. Acesso em: 15 jun. 2014.

COSME, R. L.; LUTIF J. Estudo reológico de mástiques com fíler de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e escória de aciaria. *In: CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA E ENSINO DE TRANSPORTES*, 28 Curitiba, 2013. **Anais...** Curitiba: ANPET, 2013. Disponível em: < <http://www.anpet.org.br/xxviii/anpet/anais/documents/AC376.pdf> >. Acesso em: 05 mai. 2015.

COSTA, C, *et al.* Areia descartada de fundição em substituição ao agregado fino em misturas asfálticas para pavimentação. **Revista da ABIFA – Fundição & Matérias – Primas – Ano XIII – Agosto – Ed, 123. p. 100 – 110. 2011.**

COUTINHO NETO, B. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DANTAS, A. P. A.; **Utilização de resíduos de rochas ornamentais na produção de cerâmica branca.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

DEGEN, M. K. *et al.* Concretos produzidos com resíduos provenientes de beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial de cimento. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*, 55., Gramado, 2013. **Anais...** Gramado: IBRACOM, 2013. Disponível em: < <https://lemacufes.files.wordpress.com/2012/03/concretos-produzidos-com-resc3adduos-proveninetes-do-beneficiamento-de-rochas-ornamentais-como-substituto-parcial-de-cimento.pdf> >. Acesso em 15 jun. 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 035** (1998). *Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 041** (1994). *Solos – Preparação de amostras para ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 049** (1994). *Solos – Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 080** (1994). *Solos – Análise granulométrica por peneiramento*. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 081** (1998). *Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 082** (1994). *Solos – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 086** (1994). *Agregados – Determinação do índice de forma*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 122** (1994). *Solos – Determinação de limite de liquidez*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 131** (1994). *Solos – Determinação do módulo de resiliência*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – **DNIT ME 136** (2010). *Determinação da resistência à tração por compressão diametral de misturas betuminosas*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – **DNIT ES 141** (2010). *Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER-ME – 162** (1994). *Solos – Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – **DNIT ME 164** (2013). *Solos – Compactação Utilizando Amostras Não Trabalhadas*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER ME 201** (1994). *Solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - **DNIT ES 303** (2009). *Solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER ME 398** (1999). *Agregados – Índice de Degradação após compactação Proctor (ID_p)*. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação**, 3. ed. Rio de Janeiro, 2006

EXPLORAÇÃO de calcário transforma o Cariri em polo mineral no NE. **Diário do Nordeste**, Fortaleza, 23 fevereiro 2013. Disponível em: < <http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/regional/exploracao-de-calcario-transforma-o-cariri-em-polo-mineral-do-ne-1.140951> > Acesso em: 20 de set. 2014.

FABBRI, G. T. P.; SÓRIA, M.H.A. Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno. *In*: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28. v.1 p.157-83, Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1994.

FARIAS, E. R.; **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

GANDHI, K. S. Stabilization of expansive soil of Surat region using Rice Husk Ash & Marble Dust. **International Journal of Current Engineering and Technology**. V. 3, n. 4, oct. 2013. Disponível em: < <http://inpressco.com/wp-content/uploads/2013/10/Paper651516-1521.pdf> >. Acesso em: 13 abr. 2014.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE, 2010. **Regiões Metropolitanas de Fortaleza e do Cariri**. Disponível em: < <http://www.ipece.ce.gov.br/noticias/regioes-metropolitanas-de-fortaleza-e-do-cariri> >. Acesso em: 5 set. 2014.

IPR – INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Estudos e pesquisas de rochas de pedreiras para estabelecimento de critérios de qualidade frente às normas e procedimentos existentes e sua aceitação. **Relatório final 1998**. Rio de Janeiro, 1998.

KHANDVE, P. V.; RATHI, A. S. Concrete paving block using marble stone industry waste. **International journal of Research in engineering science and technology**. v. 1, n. 087. dec. 2015. Disponível em: < <http://www.ijrests.org/publicationpaper/PaperCI45.pdf> >. Acesso em: 13 jan. 2016.

KLINSKY, L. M. G. *et al.* Efeito da adição de areia de fundição e cal em algumas propriedades de solos argilosos. **Transportes**, v. 20, n. 1, p. 22–30 2012. Disponível em: < <http://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/577> >. Acesso em: 28 abr. 2015.

LIMA, C. S. **Caracterização de ligantes asfálticos modificados com borracha de pneu e aditivo**, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

- LIMA, J. H. C. **Utilização de resíduos de construção e demolição para pavimentos urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza**, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- LOBO, A. V. L. **Avaliação do uso de agregados miúdos reciclados de concreto em concretos betuminosos usinados a quente**, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Curitiba, 2013.
- LOIOLA, P. R. R. **Estudo de agregados e ligantes alternativos para emprego em tratamentos superficiais de rodovias**, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- LUCENA, L. C. F. L. **Verificação da influência do uso de resíduos industriais como fíler em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água**. 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Centro de Tecnologia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- LUCENA, L. C. F. L. **Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e sub-base de pavimentos**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2012.
- LUZ, A. B. *et al.* **Beneficiamento do Sienito de Tanguá-RJ para Produção de Fertilizante Alternativo de Potássio**. CETEM/MCTI, 2013. 32p. (Série Rochas e Minerais Industriais, 17). Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/series/serie-rochas-e-minerais-industriais/item/111-beneficiamento-do-sienito-de-tangua-rj-para-producao-de-fertilizante-alternativo-de-potassio/111-beneficiamento-do-sienito-de-tangua-rj-para-producao-de-fertilizante-alternativo-de-potassio>>. Acesso em: 09 fev. 2015.
- LUZ, A. B. *et al.* **Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos Especificações**. Caulim. Cap. 11, p. 231 a 262. Rio de Janeiro, CETEM, Novembro/2005.
- MACÊDO, R. J. F. *et al.* Caracterização dos resíduos das indústrias cerâmicas estruturais da Região do Cariri – CE. **Caderno de Cultura e Ciência**, Ano VII, v.11, n.2, Universidade Regional do Cariri – URCA, Dez, 2012.
- MARÇAL, R. L. S. B. **Fabricação de vidros especiais a partir de resíduos da indústria de rochas ornamentais**, 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais). Curso de Pós-Graduação de Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, 2011.
- MARTIN, C. M. M. S.; RIBEIRO, R. C. C.; CORREIA, J. C. G. Utilização de rejeito oriundo do corte de rochas ornamentais como agregado mineral em pavimentação asfáltica. *In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 16., Rio de Janeiro, 2008. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM, 2008. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_XVI_jic_2008/Catarina%20Magnani%20Moureira%20Saint%20Martin.pdf> Acesso em: 05 abr. 2015.

MASCARENHAS, I. M. N. **Estudo dos solos da região do Cariri/CE para aplicação em pavimentação**. 2015. Qualificação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

MATTOS, I.C. Uso/adequação e aplicação de rochas ornamentais na construção civil – parte 1. *In*: SIMPÓSIO SOBRE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 3., Recife, 2002. **Anais...** Recife: CETEM, 2002. Disponível em: <
http://www.cetem.gov.br/files/docs/livros/2002/III_simposio_de_rochas_ornamentais_do_nordeste.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**, (2ª edição). Editora COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

MELLO, R. M. **Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – aplicações materiais) – Institutos de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2006.

MENEZES, R. R. *et al.* Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.6, p.795–801, 2008. Disponível em: <
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662009000600019>. Acesso em: 28 abr. 2015.

MESQUITA, G.M.; REZENDE, L. R. Aplicação de misturas de fosfogesso em solos tropicais finos na pavimentação. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO DA UFG – CONPEEX, 2., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: UFG, 2005. Disponível em: <
https://projetos.extras.ufg.br/conpeex/2006/porta_arquivos/posgraduacao/1671741-GlauciaMachadoMesquita.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2015.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO, **Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável: Território Cidadania do Cariri** – MDA/SDT/AGROPOLOS. Fortaleza: Instituto Agropolos do Ceará, 2010.

MIRANDA, R. A. C.; BACARJI, E.; FERREIRA R. C. Estudo da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento. *In*: ENCONTRO NACIONAL, 4., & ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2., Campo Grande, 2007. **Anais...** Rio de Janeiro: IABRJ, 2007. Disponível em:
<http://www.elecs2013.ufpr.br/wp-content/uploads/anais/2007/2007_artigo_078.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.

MISRA, A. K. *et al.* A new technology of marble slurry waste utilization in roads. **Journal of Scientific & Industrial Research**. v. 69, p. 67-72, jan. 2010. Disponível em:
<<http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/7046>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

MISHRA J.; YADAV R. K.; SINGHAI A.K. Effect of granite dust on index properties of lime stabilized black cotton soil. **International Journal Engineering Research & Science & Technology**. v. 3, n. 1, feb. 2014. Disponível em: http://www.ijerst.com/ijerstadmin/upload/IJEETC_52efd29d82175.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2015.

MOREIRA, J. M. S.; MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Reaproveitamento de resíduo de rocha ornamental proveniente do Noroeste Fluminense em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, n. 319, p. 180-186, Set. 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S036669132005000300002&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em 27 Set. 2015.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. **Sitientibus**, Feira de Santana, n. 26, p. 49-61, jan./jun. 2002. Disponível em: < <http://www2.uefs.br/sitientibus/normas.htm>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B.; BASTOS, A. J. O. Avaliação do uso de resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 07-24, Mar 2013. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-86212013000100002&script=sci_arttext >. Acesso em: 12 abr. 2015.

MOURA, W. A. *et al.* Produção de pisos intertravados com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUIDO*, 9., 2006, Florianópolis. **Artigo...** Disponível em: < http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006_4227_4236.pdf>. Acesso em 12 abr. 2014.

PALDÉS, R. J. A. Aproveitamento de rejeitos de rochas ornamentais na arquitetura, e seu uso em vias públicas. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*, 23, SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 7., 2009, Fortaleza, **Anais...** Fortaleza, CETEM, p. 127-136.

PARENTE, E. B; BOAVISTA, A. H.; SOARES, J. B. Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na Região Metropolitana de Fortaleza. **Departamento de Engenharia de Transportes**, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003. Disponível em: < http://www.det.ufc.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=40&Itemid=148 >. Acesso em: 15 nov. 2014.

PEIXOTO, L. S. **Preparação de compósitos e nanocompósitos poliméricos *in situ***, 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: < <http://portal.peq.coppe.ufrj.br/index.php/producao-academica/teses-de-doutorado/2012/98-preparacao-de-compositos-e-nacocompositos-polimericos-in-situ/file> >. Acesso em: 15 nov. 2014.

PINTO, C. S. **Reutilização de material asfáltico: avaliação da potencialidade e utilização em aterros rodoviários**. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PINTO, S. L. **Utilização de rejeito da extração e mineração de calcário laminado como material para as camadas granulares de um pavimento flexível**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2011.

PONTES, I. F.; STELLIN JÚNIOR, A. Utilização de resíduos de rochas ornamentais nas indústrias de construção civil. *In: ENCONSTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIO E METALURGIA EXTRATIVA*, 26., Natal, 2005. **Artigos...** Disponível em: <http://searchentmme.yang.art.br/download/2005/outros_temas/1664%20-%20I.F.Pontes_A.Stellin%20J%C3%BAnior%20-%20UTILIZA%C3%87%C3%83O%20DE%20RES%20DUOS%20DE%20ROCHAS%20ORNAMENTAIS%20NAS%20IND%C3%A9STRIAS%20DE%20CONSTRU%C3%87%C3%83O%20CIVIL.pdf>. Acesso em: 10 set. 2014.

PORTO, L. F. Análise do impacto ambiental do arranjo produtivo local couro calçadista do Cariri cearense. **NAU Social** - v.3, n.5, p. 13-17, nov. 2012/abr. 2013. Disponível em: <<http://www.periodicos.adm.ufba.br/index.php/rs/article/viewFile/253/186>>. Acesso em: 10 set. 2014.

QUEIROZ, F. C; FRASCÁ, M. H. O. Estudo para o aproveitamento de resíduos pétreos de marmorarias, como agregados para concreto de cimento Portland. **Exacta**, v. 6, n. 1, jan./jun., p. 83-92, 2008. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81011705010>>. Acesso em: 10 set. 2014.

QUIÑONES, F. S. **Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas**, 2014. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2014.

RAYMUNDO, V. *et al.* Resíduos de serragem de mármore como corretivo da acidez de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB., v.17, n.1, p.47–53, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v17n1/v17n01a07.pdf>>.

REDE APL MINERAL, CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM. **Cetem encerra atividades no APL Cariri**. Disponível em: <<http://www.redeaplmineral.org.br/noticias/cetem-encerra-parte-das-atividades-no-apl-do-calcario-do-cariri-2013-ce/>>. Acesso em: 03 set. 2014.

REZENDE, A. A.; MARSON, M.; VERTAMATTI, E. Emprego de agregado estéril da exploração de calcário em pavimentação de baixo custo. **Ciências Exatas**, Taubaté, v. 12, n. 2, p. 151-154, 2006. Disponível em: <<http://periodicos.unitau.br/ojs-2.2/index.php/exatas/article/viewFile/392/455>>. Acesso em: 03 set. 2014.

RIBEIRO, R. C. C. *et al.* **Utilização do calcário do Cariri cearense como agregado mineral em pavimentação asfáltica**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007a. 34p. (Série Tecnologia Mineral, 86). Disponível em: < <http://biblio.cetem.gov.br/handle/cetem/1905>>. Acesso em: 10 set. 2014.

RIBEIRO, R. C. C. *et al.* **Utilização de rejeitos de rochas ornamentais em misturas asfálticas**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007b. 42p. (Série Tecnologia Mineral, 87). Disponível em: < <http://biblio.cetem.gov.br/handle/cetem/49>>. Acesso: 05 ser. 2014.

ROCHA, A. K. A. *et al.* Argamassas mistas para alvenaria utilizando resíduo de caulim - Parte I: comportamento mecânico. **Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 4, out.-dez., 2008, p. 505-512 Escola de Minas Ouro Preto, Brasil. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56416457016>>. Acesso em: 03 set. 2014.

RODRIGUES, G. F. *et al.* Estudo de resíduos de rochas ornamentais para a produção de materiais vítreos. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 8, n. 3, p. 203-207, 2011. Disponível em: < <http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/1728399.pdf> >. Acesso em: 20 abr. 2015.

RODRIGUES, W. C. *et al.* Estudo sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de resíduo industrial de ardósia em mistura asfáltica do tipo pré-misturado a frio. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 31, 2014. Disponível em: < http://rmct.ime.eb.br/vol_XXXI_3tri_2014.html >. Acesso em: 20 abr. 2015.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações Pág. 327 a 350. Calcário e Dolomito, Cap. 15**, Rio de Janeiro, CETEM, Novembro/2005. Disponível em < <http://www.cetem.gov.br/agrominerais/teste/livros/16-agrominerais-calcario-dolomito.pdf> >. Acesso em: 15 jun. 2014.

SILVA, B. T. A. **Utilização de materiais alternativos para a construção de pavimentos urbanos na região metropolitana de Fortaleza**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SILVA, F. D.; OLIVEIRA, F. M. C.; SOUZA, J. C. Aplicabilidade do resíduo industrial de rochas ornamentais na indústria cerâmica. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 23., 2009, Fortaleza. **Anais...** Ceará: CETEM, 2009. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/1474/23simpgeol200916-25.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

SILVEIRA, V. L.; SILVA, B. E. P.; GUIMARÃES, A. C. R. Caracterização física, química e mecânica de misturas solo/cinza de caldeira a coque para emprego em camadas de base e sub-base. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 28., Curitiba, 2013. **Anais...** Curitiba: ANPET, 2013. Disponível em: < <http://www.anpet.org.br/xxviiiianpet/anais/documents/AC376.pdf> >. Acesso em: 05 mai. 2015.

SOUSA, G. M. **Estudo experimental de escórias de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Escola de Minas da Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

SOUSA, L. P. **Propriedades mecânicas do resíduo de britagem de rocha calcária empregado como material de preenchimento de aterro**. 2016. Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: < <http://monografias.ufrn.br/jspui/handle/123456789/2363>>. Acesso em: 05 mai. 2015.

SOUZA, L. R.; RIBEIRO, R. C. C.; CARRISSO, R. C. C. Aplicação de resíduos oriundos do corte de mármore na matriz do polipropileno. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*, 23., 2009, Fortaleza. **Anais...** Ceará: CETEM, 2009. Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/1474/23simpgeol200916-25.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

SOUZA, A. J.; PINHEIRO, B. C. A; HOLANDA, J. N. F. Efeito da adição de resíduo de rocha ornamental nas propriedades tecnológicas e microestrutura de piso cerâmico vitrificado. **Cerâmica**. 2011, v.57, n.342, pp.212-218. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132011000200013>>. Acesso em: 12 abr. 2015

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SUASSUNA, P. M. BRASILEIRO, M. I.; PRADO, A. C. A. Reaproveitamento do rejeito da extração e beneficiamento da pedra cariri em massas cerâmicas. *In: Encontro Universitário da UFC no Cariri*, 4., 2012. **Anais...** Juazeiro do Norte. Disponível em: < <https://encontros.ufca.edu.br/index.php/encontros-universitarios/eu-2012/paper/view/1251>>. Acesso em: 14 jun. 2014.

TAPAHUASCO, W. F. C. *et al.* **Utilização de resíduos oriundos do corte de rochas graníticas como agregado mineral em misturas de concreto asfáltico**. 2014. Disponível em: < <http://www.cobramseg2014.com.br/anais/2012/arquivos/2012.246.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

TAVARES, D. S.; MOTTA, L. M. G.; ODA, Sandra. Utilização do Agregado Siderúrgico (Escória de Aciaria) em Pavimentação Asfáltica. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCESSÕES RODOVIÁRIAS*, 7., Foz do Iguaçu, 2011. **Anais...** São Paulo: CB&C, 2011. Disponível em: < <http://cbrcbrasvias.com.br/palestras/arquivos/TC0004-1.PDF> >. Acesso em: 14 jun. 2014.

VALE, A. C. **Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

VERÍSSIMO, L. S.; CAVALCANTE, I. N. As águas subterrâneas do CRAJUBAR, Região do Cariri – Estado do Ceará – Brasil. *In: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER*, 1., Fortaleza, 2000. **Anais...** Fortaleza: ABAS. Disponível em: < <http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/23450/15537> >. Acesso em: 14 nov. 2014.

VIDAL, F. W. H.; PADILHA, M. W. M.; OLIVEIRA, R. R. Aspectos geológicos da bacia do Araripe e do aproveitamento dos rejeitos da Pedra Cariri – Ceará. *In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE*, 5., Recife, 2005. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM, 2006. Disponível em: < <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2006-002-00.pdf> >. Acesso em: 15 jun. 2014.

VIDAL, F. W. H. *et al.* O arranjo produtivo local da Pedra Cariri. *In: PREVENÇÃO E GESTÃO DE CONFLITOS NA MINERAÇÃO*, Santiago/Chile, 2008. **Comunicação Técnica...** Rio de Janeiro: CETEM, 2008. Disponível em: < <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2008-031-00.pdf> >. Acesso em: 15 jun. 2014.